

Mikko Vuontila

TERÄSBETONIPILARIN KORVAAMINEN LIIMAPUUPILARILLA

Opinnäytetyö

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Marraskuu 2016



KYAMK
University of Applied Sciences

Tekijä (tekijät) Mikko Vuontila	Tutkinto Insinööri	Aika Marraskuu 2016
Opinnäytetyön nimi Teräsbetonipilarin korvaaminen liimapuupilarilla		53 sivua 10 liitesivua
Toimeksiantaja Kymenlaakson ammattikorkeakoulu		
Ohjaaja Lehtori Jani Pitkänen		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli tarkastella ja suunnitella teräsbetonipilarin korvaaminen ympäristöystävällisellä ja samalla kantaviin rakenteisiin mahdollisimman hyvin soveltuvalla materiaallilla. Alkuperäinen ajatus oli korvata teräsbetonipilari puusta valmistetulla pilarilla. Elinkaaren kokonaispäästöt, ympäristön kuormitus ja uudelleenkäytön mahdollisuudet tukivat valintaa tarkastella puusta valmistettua pilaria. Tulevaisuudessa ympäristövaikutukset ovat yhä merkittävämmässä asemassa valittaessa rakennusmateriaaleja.</p> <p>Vaihtoehtoisista puusta valmistetuista tuotteista tarkastelun kohteeksi valikoitui liimapuu. Teknisiltä ominaisuuksiltaan liimapuu on erinomainen vaihtoehto runkorakenteen materiaaliksi. Liimapuu on lujempaa ja jäykempää kuin vastaavankokoinen sahatavara sekä omaan painoonsa nähden lujempaa ja jäykempää kuin mikään muu rakennusaine.</p> <p>Työn teoriaosuudessa tarkastellaan pilarin valintaan sekä yläpään ja alapään liitosten mitoituksen vaikuttavia tekijöitä. Eurokoodit ovat kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia eurooppalaisia standardeja. Suomessa liimapuusta valmistettujen kantavien rakenteiden mitoituksessa noudatetaan Eurokoodi 5 suunnittelustandardia. Liitoksissa käytettävien teräsosien suunnittelu tehdään Eurokoodi 3 suunnittelustandardin mukaisesti. Opinnäytetyössä esitetyt liimapuupilaria koskevat laskelmat on tehty käsinlaskentana.</p> <p>Työn tavoitteena oli kartoittaa ja tuoda uusia näkökulmia sekä mahdollisuuksia korjausrakentamiseen. Samalla kantava ajatus oli, että vanhan teräsbetonipilarin korvaavan, uuden pilarin jälkiasennus tulee olla mahdollisimman helppoa ja turvallista. Työn tuloksena syntyi yksi mahdollinen tapa korvata pilari ja näin ollen päästiin tavoitteeseen.</p>		
<p>Asiasanat liimapuu, liimapuupilarin mitoitus, Eurokoodi 3, Eurokoodi 5.</p>		

Author Mikko Vuontila	Degree Bachelor of Engineering	Time November 2016
Thesis Title Replacing a reinforced concrete column by using a glulam column		53 pages 10 pages of appendices
Commissioned by Kymenlaakso University of Applied Sciences		
Supervisor Jani Pitkänen, Senior Lecturer		
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this bachelor's thesis was to examine and design a replacement for the reinforced concrete column by using an environmentally friendly material suitable for construction of load-bearing structures. The idea was to replace the reinforced concrete column with column made out of timber. The environmental impact of the material will play an increasingly important role when selecting building materials in the future.</p> <p>Out of all the alternative derivate wood products, timber glulam was selected as a subject for closer examination for this study. The technical characteristics of glulam make it an excellent alternative material for frame structures. In relation to its self-weight, glulam is firmer and more rigid compared to an equivalent sized timber or any other building material.</p> <p>The theoretical framework of the study consists of examination of factors affecting the selection of the column and the designing of the joints at both ends of the column. Eurocodes are European standards considering the designing of bearing structures. In Finland, dimensioning complies with the requirements of the Eurocode 5 standard for designing glulam structures. Joints are designed in accordance with the requirements of the Eurocode 3 standard. The design calculations of the glulam column have been calculated manually.</p> <p>The aim of this thesis was to examine and discover new aspects and opportunities in renovation. The other objective of the study was to ensure that the reconstruction of the alternative column is easy and safe when replacing the reinforced concrete column. As a result of this study, one alternative method to replace the column was discovered and the aim of this study was achieved.</p>		
<p>Keywords glulam, structural calculation of glulam column, Eurocode 3, Eurocode 5</p>		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	ELINKAARIAJATTELU JA HIILIJALANJÄKI	6
3	KORJAUSRAKENTAMISEN SUUNNITTELUTIETOJEN HANKINTA	7
3.1	Lähtötiedot	8
3.2	Määritelmät	14
4	PILARIN VALINTA	14
5	PILARIN MITOITUKSEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	16
5.1	Liimapuupilarin materiaaliominaisuudet	17
5.2	Mitoituksen perustana Eurokoodi 5	19
5.3	Pilarin nurjahduksen mitoitus	22
5.4	Pilarin jäykkyyden vastaavuus	28
5.5	Pilarin palotekninen mitoitus	30
5.6	Pilarin kosteustekniset ominaisuudet	33
5.7	Pilarin yläpään tukipinta	34
6	PILARIN LIITOKSET	35
6.1	Liitosten teräsosat	36
6.2	Pilarin alapään liitoksen mitoitus	37
6.3	Pilarin yläpään liitoksen mitoitus	43
7	VÄLIAIKANEN TUENTA	48
8	PILARIN VAIHTO	48
9	PÄÄTELMÄT	50
	LÄHTEET	51

LIITTEET

Liite 1. Liimapuupilarin mitoitus

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan kuvitteellista korjausrakentamisen korjaustoimenpidettä. Olemassa olevan rakennuksen rungon yksittäinen teräsbetonipilari korvataan uudella pilarilla. Rakennus on mastojäykisteinen teollisuushalli, jonka runko muodostuu pilaripalkkijärjestelmän mukaisista teräsbetonielementeistä. Tämän teräsbetonista valmistetun pilarin korvaavaksi valmistusmateriaaliksi valittiin liimapuu.

Tarve rakennuskannan korjausrakentamiselle on jatkuvaa. Pelkästään muuttuvien tarpeiden ja teknisen toimivuuden kannalta tulisi korjaustarpeita tarkastella ja suunnitella rakennuksen eri elinkaaren vaiheissa. Niin uusrakentamisessa kuin korjausrakentamisessa ympäristö- ja laatutekijöiden johdosta paikallisuus ja ympäristöystävällinen rakentaminen valtaavat yhä enemmän alaa.

Korjausrakentamisessa materiaalina puu on varteenotettava vaihtoehto. Puu on uusiutuvaa, luonnosta saatavaa, ympäristöystävällistä ja energiatehokasta orgaanista solumaista kiinteää materiaalia. Puun jalostus kuluttaa vähän energiaa ja käytettäessä puuta rakennusmateriaalina sidotaan myös hiiltä koko puutuotteen elinkaaren ajan. Rakennusmateriaalina ollut puu voidaan uusiokäyttää. Lisäksi on mahdollista monipuolisesti suunnitella ja työstää vähän ympäristöä kuormittavia rakenteita.

Työn tavoitteena oli suunnitella ja mitoittaa liimapuupilari, jolla olisi mahdollista korvata teräsbetonipilari niin että olemassa oleva liitostekniikka olisi mahdollista hyödyntää. Tarkastelu tehdään yksittäiselle mastopilarille, sillä oletuksella, että pilarin vaihdoksella ei ole vaikutusta rakennuksen rungon mitoitukseen. Rakennus on alun perin suunniteltu Suomen rakentamismääräyskokoelman säännösten ja ohjeiden mukaisesti. Liimapuupilarin mitoitus tehdään käsinlaskentana perustuen Eurokoodi-järjestelmän mukaisiin standardeihin.

Kantavana ajatuksena oli tuoda esiin uusia näkökulmia korjausrakentamisen maailmaan. Erilaiset hybridirakenteet ja rakennelmat ovat tulevaisuudessa vahvemmin mukana suunnittelupöydällä ratkottaessa uudis- ja korjausrakentamisen haasteita. Liimapuusta on mahdollista valmistaa monipuolisesti kantavia rakenteita.

2 ELINKAARIAJATTELU JA HIILIJALANJÄKI

Rakennus vaikuttaa ympäristöönsä koko sen elinkaaren ajan. Ympäristövaikutuksien kannalta on tärkeä nähdä rakennus kokonaisuutena, jolloin tärkeässä roolissa rakennettaessa ovat suunnittelu, rakennusaineet ja rakennustyöt. Rakennuksen ollessa käytössä ovat käytön, huollon ja korjauksen vaikutukset oleellisessa osassa elinkaaren kokonaispäästöjen kannalta. Rakennusta purettaessa suunnittelupöydällä tehdyt ratkaisut vaikuttavat kierrätyksestä ja jätteenkäsittelystä aiheutuviin kustannuksiin ja päästöihin. Elinkaaren erivaiheilla materiaalilogistiikalla on suuri merkitys elinkaaren kokonaispäästöjen kannalta. Rakennuksen elinkaaren vaiheet on esitetty kuvassa 1. (UPM Timber 2016.)



Kuva 1. Rakennuksen elinkaaren vaiheet (UPM Timber 2016.)

Hiilijalanjälki kertoo siitä kuinka paljon toiminnan tai tuotteen elinkaaren aikana syntyy kasvihuonekaasuja ja toimii näin ollen myös apuvälineenä kartoitettaessa ja laadittaessa suunnitelmia tuotteesta aiheutuvien päästöjen vähentämiseksi (UPM Timber 2016).

Puun kasvaessa ja yhteyttäessä sitoutuu ilman sisältämästä hiilidioksidista hiili osaksi puuainetta. Puuaineksesta noin puolet on hiiltä. Valmistettaessa puutuotteita energiaa tuotetaan enemmän kuin sitä kulutetaan. (Puuinfo 2009a, 8, 9.)

Puutuotteiden osalta hiilijalanjälki jaetaan sekä biogeeniseen että fossiiliseen hiilijalanjälkeen ja ilmoitetaan sahatavaran osalta muodossa kg/m³. Biogeenisellä hiilijalanjäljellä tarkoitetaan puuhun tai puusta valmistettuun tuotteeseen

varastoituneen hiilidioksidin määrää. Kuusesta valmistetuille tuotteilla biogeeninen jalanjälki on 700 kg/m^3 ja männyn osalta se on vastaavasti 810 kg/m^3 . Fossiilisella hiilijalanjäljellä tarkoitetaan tuotteen elinajan todellisia päästöjä. Kuusella fossiilinen hiilijalanjälki on 60 kg/m^3 ja männyllä vastaavasti 80 kg/m^3 . (UPM Timber 2016.)

Korjausrakentamishankkeeseen ryhdyttäessä on jo suunnittuvaiheessa huomioitava, että rakennusmateriaalin valmistukseen kuluu energiaa ja se aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä. Liimapuun valmistukseen kuluu energiaa $2,4 \text{ kWh/kg}$ ja valmistaminen aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä noin $0,25 \text{ CO}^2\text{kg/kg}$. Betonin valmistukseen kuluu energiaa $0,2 - 2,2 \text{ kWh/kg}$ ja valmistaminen aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä $0,1 - 0,5 \text{ CO}^2\text{kg/kg}$. (Hammond & Jones 2008, 11, 25, 52.); (Puuinfo 2009b, 2.)

Oletetaan että yksi kuutio betonia painaa noin $2\,300 \text{ kg}$ ja liimapuu vastaavasti noin 500 kg . Valmistettaessa kuution verran liimapuuta, kulutetaan valmistusprosessissa energiaa noin $1\,200 \text{ kWh}$ ja siitä aiheutuu hiilidioksidipäästöjä noin $125 \text{ CO}^2\text{kg}$. Vastaavasti betonikuution valmistukseen kuluu energiaa noin $460 - 5\,060 \text{ kWh}$ ja siitä aiheutuu hiilidioksidipäästöjä noin $230 - 1\,150 \text{ CO}^2\text{kg}$.

3 KORJAUSRAKENTAMISEN SUUNNITTELUTIETOJEN HANKINTA

Kiinteistön säännöllinen ja oikea-aikainen huolto ja ylläpito pidentävät rakennusosien käyttöikää ja vähentävät korjaustarvetta. Mittavimmat korjaustoimenpiteet ovat merkittävä osa rakennukselle aika ajoin edellytettäviä tehtäviä. Korjaushankkeen yhteydessä on mahdollisuus nostaa rakennuksen laatutasoa. (Stambej 2015.)

Saneeraushankkeissa kantavien rakenteiden korjaustoimenpiteet suunnitellaan ja toteutetaan eritavoin uudisrakentamiseen nähden. Rakennuskohteen perusteellinen tunteminen on edellytyksenä korjaustyön suunnittelulle. Ensiksi tulee selvittää korjattavan kohteen rakentamisaikaiset suunnitelmatiedot. Lähötietojen selvittämisen kannalta on oleellista tehdä rakenteiden silmämääräiset tutkimukset, runkorakenteiden kuntotutkimukset, mittauspiirustusten laati-

minen sekä rakenteellisten yksityiskohtien valokuvaaminen. (Lindberg 1994, 253.)

Korjaussuunnittelussa onnistuminen edellyttää, että selvitetään kohteen runkorakenteiden rakennusjärjestelmä, olemassa olevien rakenteiden kantavuus sekä rakenteiden kuntotaso. Rakenteiden kantavuus pyritään ensisijaisesti osoittamaan laskennallisesti. Mikäli laskennallisesti ei voida osoittaa riittävää kantavuutta, voidaan materiaalien todelliset ominaisuudet selvittää näytteiden avulla. On myös mahdollista tehdä koekuormituksia, mikä tosin saattaa olla vaikeaa, kun kyseessä on puristettu rakenne. Kantavaa rakennetta voidaan vahvistaa tai rajoittaa kuormitusta. Mikäli edellä mainitut keinot eivät anna riittävän hyvää tulosta, viimeisenä keinona voidaan pitää rakenteen purkamista ja uudelleen kasaamista. (Lindberg 1994, 258.)

Betonirakenteet voivat vaurioutua monista eri syistä. Mahdollisia vaurioitumiseen johtavia syitä voivat olla mm. valmistusvirheet, suunnitteluvirheet, ylikuormittaminen, raudoituksen korroosio, kuuluminen, pakkasvauriot, tulipalo, rakenteelliset syyt ja elementtien vauriot. Yleisempiä syitä rakenteiden vaurioihin teräsbetonirakenteissa ovat valmistusvirheet. (Lindberg 1994, 257.)

Tutkimuskohteena olevan rakennuksen kantavissa rakenteissa ei ole havaittu suunnittelusta, valmistuksesta, asennuksesta tai käytöstä aiheutuneita vaurioita. Tässä opinnäytetyössä esitetään ja mitoitetaan yksi vaihtoehto, edellä mainituista syistä mahdollisesti vaurioituvan, jo olemassa olevan pilarin korvaajaksi.

3.1 Lähtötiedot

Opinnäytetyön tutkimuskohteeksi valittu rakennus on käytössä oleva logistiikkahalli. Runko on teräsbetonielementeistä valmistettu pilari-palkkirunko. Rakennus on suunniteltu Suomen rakennusmääräyskokoelman mukaisesti. Alkuperäisessä rakennusta koskevassa suunnitelmassa on pysyväksi kuormaksi eli rakenteiden omaksi painoksi esitetty 358 kN. Nykyinen mitoituksen lähtöarvo on saatu jakamalla alkuperäinen arvo luvulla 1,2. Lisäksi suunnitelmassa on tuulikuorma harjalle 8,7 kN ja seinälle 4,6 kN/m. Nykyisen mitoituksen lähtöarvot on saatu jakamalla alkuperäiset arvot luvulla 1,6.

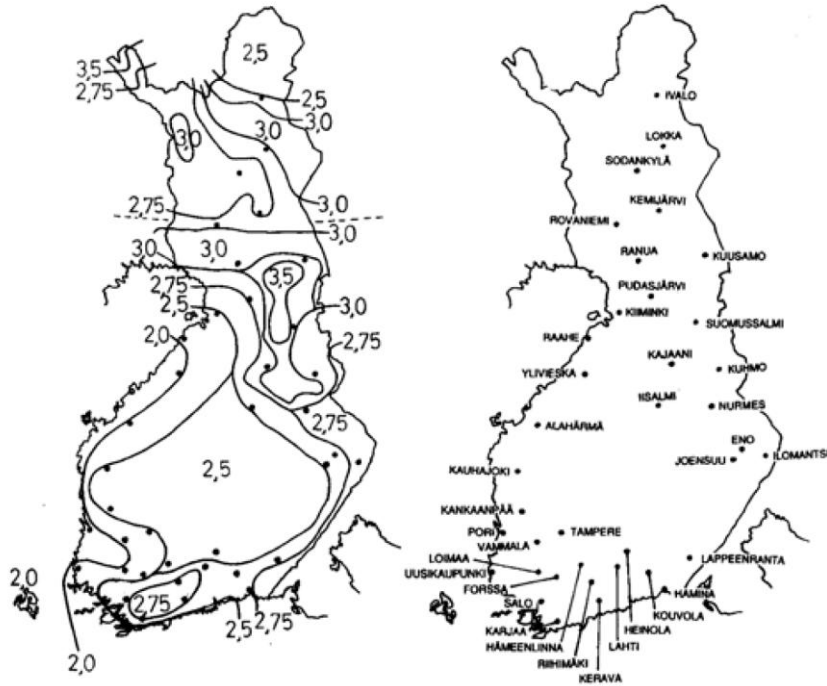
Olemassa olevan rakennuksen perustiedot:

Pääasiallinen käyttötarkoitus	logistiikka- ja varastorakennus
Seuraamusluokka	CC2
Paloluokka	P1 (R90)
Pääasiallinen rakennustapa	Paikalla rakentaminen
Korkeus (vapaa)	8,0 m
Rakennuksen korkeus	11,5 m
Rakennuksen rungon leveys	34,2 m
Ala	4 468 brm ²
Tilavuus	37 950 m ³

Pilariin vaikuttavat kuormat:

Pysyvät kuormat (G_k)	358 kN
Lumikuorma maassa (s_k)	2,75 kN/m ²
Tuulikuorma harjalla (q_{w1})	5,44 kN
Tuulikuorma seinälle (q_{w2})	2,88 kN/m

Lumikuorma maassa määräytyy rakennuspaikan mukaan. Kuvassa 2 on esitetty lumikuormien ominaisarvot maassa. Vuosittaisen ylittymisen keskimääräinen todennäköisyys on perustana lumikuorman ominaisarvolle.



Kuva 2. Ominaislumikuormien arvot maassa s_k (Puuinfo 2011, 11.)

Suunnittelussa tulee huomioida sekä kinostumattomasta että kinostuneesta lumesta aiheutuvat kuormat. Lumikuorma q_k saadaan laskettua kaavalla 1. Kaavassa huomioidaan maanpinnan lumikuorma sekä rakennuksen katon ominaisuuksien mukainen muotokerroin. (RIL 205-1-2011a, 92, 94.)

$$q_k = \mu_i \times s_k \quad (1)$$

jossa

$$\mu_i = \text{muotokerroin}$$

$$s_k = \text{maanpinnan lumikuorma}$$

Tuulikuorma on mahdollista laskea yksinkertaistetulla menettelyllä, jolloin mitoitus tehdään rakennuksen kokonaisstabiilitetin tai rakenteen osapintojen ja kiinnitysten mukaisesti. Rakennuksen kokonaisstabiilitetin laskennassa käytetään vaakasuuntaista kokonaistuulikuormaa. Kokonaistuulikuorman ominaisarvoon vaikuttavat rakenteen voimakkeroin, nopeuspaineen ominaisarvo, sekä rakenteen tuulta vastaan kohtisuora projektiopinta-ala. Kokonaistuulikuor-

man ominaisarvo $F_{w,k}$ lasketaan kaavan 2 mukaisesti. (RIL 205-1-2009, 38, 39.)

$$F_{w,k} = c_f \times q_k(h) \times A_{ref}$$

(2)

jossa

$c_f = \text{voimakerroin}$

$q_k(h) = \text{korkeutta } h \text{ vastaava nopeuspaine}$

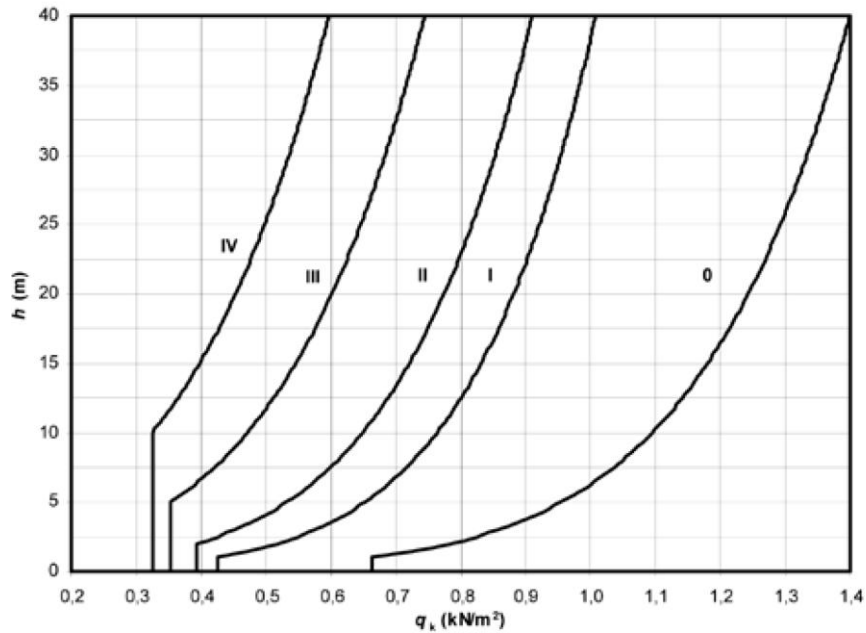
$A_{ref} = \text{rakenteen tuulta vastaan kohtisuora projektiopinta –}$
ala

Suomessa tuulennopeuden perusarvo on $v_{b,0} = 21$ m/s. (RIL 201-1-2011a, 125.)

Taulukko 1. Maastoluokat (Puuinfo 2011, 12.)

Luokka	Maaston rosoisuuden ja pinnanmuodon kuvaus.
0	Avomeri tai merelle avoin rannikko.
I	Järvi tai alue, jolla on vähäistä kasvillisuutta eikä esteitä.
II	Alue, jolla on matalaa kasvillisuutta ja erillisiä puita tai rakennuksia, joiden etäisyys toisistaan on vähintään 20 kertaa esteen korkeus. Esim. maatalousmaa.
III	Esikaupunki- tai teollisuusalueet sekä metsät. Matalat pientaloalueet ja kylät.
IV	Yhtenäiset laajat kaupunkialueet, joiden pinta-alasta vähintään 15% on rakennettu ja rakennusten keskimääräinen korkeus on yli 15 m.

Nopeuspaine on riippuvainen rakennuksen korkeudesta sekä maastoluokasta. Mahdolliset maastoluokat on esitetty taulukossa 1 ja nopeuspaineen ominaisarvot on esitetty kuvassa 3. (RIL 205-1-2009, 38, 39.)



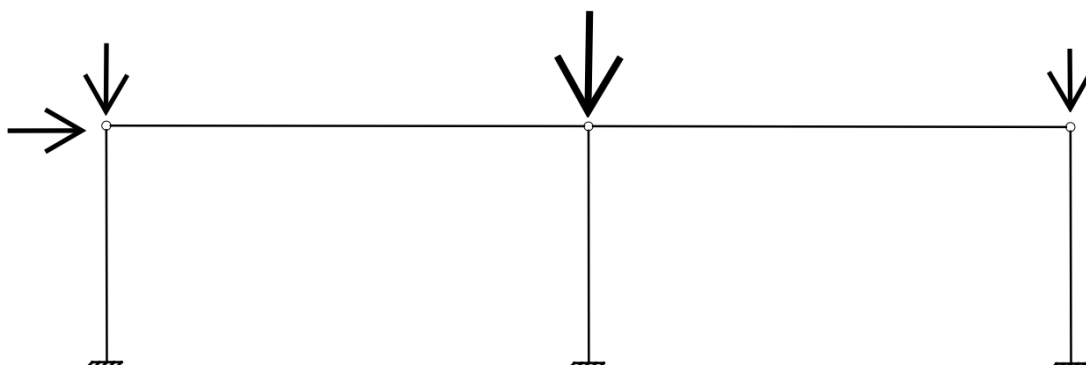
Kuva 3. Nopeuspaineen ominaisarvot $q_k(h)$ (Puuinfo 2011, 13.)

Voimakerroin huomioi rakennuksen hoikkuuden ja mittasuhteiden sekä tuulesta aiheutuvan kitkan vaikutuksen. Voimakertoimen c_f arvot perustuvat tuulitunnelikokeisiin ja ne on esitetty taulukossa 2. (RIL 201-1-2011a, 135, 136, 137.)

Taulukko 2. Yksinkertaistetun menettelyn voimakertoimet c_f (Puuinfo 2011,13.)

Kuvaus	c_f
Umpinainen rakennus yleensä	1,3
Pulpettikattoinen umpinainen rakennus tarkasteltaessa kattolapteen suuntaista tuulta, kun katon kaltevuus on 5°...40° (toisessa suunnassa $c_f = 1,3$)	1,5
Osittain avoin rakennus, kun tuulen puoleisella sivulla olevien aukkojen pinta-ala on enintään 30 % rakennuksen ulkoseinien kokonaispinta-alasta.	1,6
Erillinen seinämä	2,1

Logistiikkahallin pilarit ovat kuvassa 4 esitetyn staattisen mallin mukaisesti kiinnitetty jäykästi perustuksiin. Kaikki pilarit ottavat vastaan pysty- ja vaakakuormia. Pilarit ovat mitoitettu mastopilareina.



Kuva 4. Rakennuksen staattinen malli

Korvattavan teräbetonipilarin poikkileikkausmitat ovat 480 mm x 480 mm. Teräsbetonipilarin pääraudoitus on 8 T25 ja betonina on käytetty K 60-1. Pilarin alapään liitoksessa on käytetty pilarikenkänä 4 PEC 36.

Suunnittelu ja toteutus ovat ensisijaisessa asemassa rakenteen luotettavuuden kannalta. Rakenne on suunniteltava niin, että ehdot riittävän kestävyys, käyttökelpoisuuden ja säilyvyyden osalta täyttyvät, minkä lisäksi valittavan rakennusmateriaalin tulee täyttää kantaville rakenteille asetetut vaatimukset. Suunnittelun perustana on rajatilamitoitus, joka käsittää mitoitustarkastelut sekä murtorajatilassa että käyttörajatilassa. (RIL-201-1-2011, 23, 27, 28.)

Vain murtorajatilatarkastelulla on merkitystä mitoitettaessa teräsbetonipilareita. Rakennuksessa pilarit toimivat stabiileina rakenteina välittäen muilta rakenteilta tulevat kuormat perustuksille. Mitoitusehtoina tulee huomioida, että pilarin jokaisella poikkileikkauksella tulee olla riittävä kestävyys paikallisille rasituksille sekä riittävä jäykkyys ilman että se heikentää rakennusrungon kokonaisstabiilisuutta. Rakennetta mitoitettaessa geometrisen epälineaarisuuden vaikutus voimasuureisiin ei saa muodostua huomattavaksi. Teräsbetonipilarin suorakaidepoikkileikkauksina tulisi käyttää neliö- tai suorakaidemuotoa, niin että sivun pituudet ovat 280, 380, 480 tai 580 mm. (Leskelä 2008, 419.)

3.2 Määritelmät

Pilari	Puristettu tai vedetty sauva, joka on usein pystysuorassa asennossa ja kantaa yläpuolisten rakenteiden kuormat.
Käyttörajatila	Tila, jonka ylittämisen jälkeen käyttökelpoisuusvaatimukset eivät enää täyty.
Murtorajatila	Tila, jolloin rakenne sortuu tai vaurioituu.
Pysyvä kuorma (G)	Kuorma, joka vaikuttaa todennäköisesti koko annetun tarkastelujakson ajan ja jonka suuruuden vaihtelu ajan myötä on merkityksetöntä tai jonka muutos tapahtuu aina samaan suuntaan tiettyyn raja-arvoon asti. Kuorma aiheutuu kohteen omasta painosta, johon kuuluvat muun muassa rakennusosat ja kiinteät laitteet. Kuorma ei liiku.
Muuttuva kuorma (Q)	Kuorma, jonka suunta vaihtelee ajan myötä. Muuttuvat kuormat vaikuttavat rakenteen kannalta epäedullisimmassa kohdassa. Tällaisia ovat hyöty-, lumi- ja tuulikuormat. On mahdollista, että kuorma liikkuu.
Kuorman ominaisarvo (F_k)	Kuormaa ensisijaisesti edustava arvo.
Kuorman mitoitusarvo (F_d)	Arvo, joka saadaan kertomalla ominaisarvo F_k osavarmuusluvulla Y_f .

4 PILARIN VALINTA

Vaihtoehtoisia ratkaisuja puusta valmistettavaksi pilariksi ovat yhteen liitetty sahatavara, yhteen liitetyt viilupuut tai liimapuu. Tässä opinnäytetyössä teräsbetonipilarin korvaavaksi tuotteeksi on valittu liimapuusta valmistettu pilari.

Liimapuu on puujaloste. Se on lankuista tai laudoista yhteen liimattua rakenneselementtiä, jossa syyn suunta on elementin pituussuunnassa ja liimasaumat samansuuntaiset kuin poikkileikkauksen leveysuunta, jolloin sitä kutsutaan liimapuuksi. Liimapuun lujuus- ja jäykkyysominaisuudet ovat paremmat kuin vastaavan kokoisella sahatavarakappaleella. Puuraaka-aineen tekniset ominaisuudet ovat liimapuussa optimoituja. Omaan painoonsa nähden se on lujempaa kuin mikään muu rakennusaine, minkä lisäksi puuraaka-aineen käyttö on tehokkaampaa kuin käytettäisiin tavallista sahatavaraa. Pohjoismaissa raaka-aineena käytetty puutavara on lujuusluokiteltua kuusta tai mäntyä. Liimapuun raaka-aine on uusiutuvaa ja on mahdollista käyttää tuote uudelleen tai uusiokäyttää. Liimapuu ei väänny eikä kierry ja sitä voi työstää sekä työstökoneille että yksinkertaisilla käsityökaluilla. (Suomen Liimapuu-yhdistys ja Puuinfo Oy 2014, 7, 8, 19.)

Puu ja liimapuu eroavat muista hallien rungoissa käytetyistä rakennusmateriaaleista kuten teräsbetonista ja teräksestä monin tavoin. Puu on luonnonmateriaali jonka ominaisuudet vaihtelevat. Ominaisuudet vaihtelevat eri suunnissa sekä hygroskooppisuutensa johdosta puun kosteussuhde muuttuu ympäristön kosteuden muuttuessa. (Suomen Liimapuu-yhdistys ja Puuinfo 2015a, 2-9.)

Liimapuu valmistetaan ja CE-merkitään valvotussa teollisessa prosessissa. Lisäksi liimapuun valmistaja on velvollinen tekemään tuote-eräkohtaisen suoritusosoituksen. Liimapuuta koskeva voimassa oleva harmonisoitu tuotestandardi on EN 14080:2005. (Suomen Liimapuu-yhdistys ja Puuinfo 2014, 17.)

Liimapuuelementtiin voidaan kiinnittää teräsosia liimapuuelementtejä valmistavalla tehtaalla. Tällaisia teräsosia ovat esimerkiksi pilarin alapään pilarikenkä liimaruuveineen. Tehdasolosuhteissa sisätiloissa ja säältä suojassa kiinnitetyt teräsosat takaavat työmaalla tehtäviä kiinnityksiä paremman laadun. (Suomen Liimapuu-yhdistys ja Puuinfo 2014, 36, 48.)

Liimapuu valmistetaan tavallisesti kahdesta eri lujuusluokan lamellista, niin että poikkileikkauksen uloimmilla pinnoilla on, suurempien jännitysten takia, paremman lujuusluokan puuta. Mikäli halutaan homogeenista liimapuuta, voidaan elementti valmistaa kokonaan saman lujuusluokan liimapuusta. (Suomen Liimapuu-yhdistys ja Puuinfo 2015a, 1-7.)

Liimapuuelementin suurin poikkileikkaus on normaalitilanteessa 290 mm. Elementin korkeutta on mahdollista kasvattaa 45 mm paksuin lamellijain. Tulee kuitenkin huomioida, että liimapuuta, jossa on vähemmän kuin neljä lamellia (180 mm) ei kutsuta liimapuuksi vaan liimatuksi rakennesahatavaraksi. Kuljetuskustannuksista ja kuljetuskalustosta johtuen liimapuuelementtien pituudet ovat yleensä alle 16 m. On kuitenkin mahdollista valmistaa jopa 60 m pitkiä elementtejä. (Carling 2003, 16.)

Käytännössä suurin yhdestä puusta valmistettava, saatavilla olevan sahatavaran poikkileikkausleveydestä johtuva, liimapuupilarin poikkileikkausmitta on 265 mm. Mikäli on tarvetta suuremmalle poikkileikkaukselle, voidaan leveyttä kasvattaa esimerkiksi liimaamalla tai pulttaamalla kaksi pilaria yhteen. On myös mahdollista, että liimapuupalkin leveyttä kasvatetaan ns. muurausmenetelmällä, jossa eri levyisiä lamelleja liimataan yhteen vuorotellen, jolloin lamellien saumat limittyvät keskenään.

Teräsbetonipilarin ja liimapuupilarin poikkileikkausmitoista sekä olemassa olevista liitoksista johtuen liimapuupilarin poikkileikkaus (leveys) tulee ylittämään yhdestä lamellista maksimissaan saatavan arvon. Oletuksena on, että liimapuuta valmistava tehdas kykenee liimaamalla yhdistämään kaksi pilari yhdeksi pilariksi. Laskelmat tullaan esittämään niin, että kyseessä olisi yksi pilari, kuitenkin niin, että poikkileikkausmitat johdetaan kahden erillisen pilarin poikkileikkauksien yhteisestä pinta-alasta.

5 PILARIN MITOITUKSEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Puusta valmistetun pilarin mitoitukseen vaikuttaa monta tekijää. Mitoittavia tekijöitä ovat olemassa olevan rakennuksen perustiedot, joiden pohjalta uusi korvaava pilari mitoitetaan. Uuden puisen pilarin mitoituksen perustana on Eurokoodi 5:ssä sekä sen Suomen kansallisissa liitteissä määritellyt mitoitustarkastelut.

Kantavien rakenteiden suunnittelun perustana on rajatilamitoitus osavarmuusluvin. Rakenteiden kestävyyttä tarkastellaan murtorajatilassa. Ylitettäessä murtorajatilamitoitus rakenteen kyky kantaa sen kannettavaksi suunniteltuja kuormituksia voidaan katsoa menetetyksi. Eri materiaaleille sekä muuttuville ja pysyville kuormituksille on omat osavarmuuskertoimet. On epätodennäköistä,

että kaikki mahdolliset kuormitustapaukset vaikuttaisivat rakenteeseen samaan aikaan suurimmalla mahdollisella arvollaan. Näin ollen eri kuormitusten yhteistä vaikutusta rakenteeseen arvioidaan kuormien yhdistelymenetelmällä. (Salmi 2012, 25 - 26.)

Laskenta ja mitoitus liimapuukurakenteille tulee tehdä hyväksyttävien sääntöjen mukaisesti. Eurokoodi 5:ssä edellytetään, että kokeneet ja pätevät henkilöt suunnittelevat rakenteet, rakennuspaikat, tehtaot ja työpajat. Rakenteiden on oltava riittävän valmistuskontrollin alaisia, minkä lisäksi rakennusmateriaaleja ja -tuotteita tulee käyttää kuten Eurokoodi 5:ssä tai vastaavissa materiaali- ja tuoteselosteissa on esitetty. Rakennusta on käytettävä ja huollettava suunnitelmissa edellytetyllä tavalla. (Carling 2003, 42.)

5.1 Liimapuupilarin materiaaliominaisuudet

Liimapuun lujuusluokka on standardin EN 14080 mukaan mahdollista määrittää laskennallisesti. Lujuusluokan voi määrittää myös palkkien koekuormituksen avulla tai standardissa EN 14080 kuvatun luokittelumenettelyn avulla. Yleensä liimapuun lujuuden määrittelyn perustana on liimapuun poikkileikkauksen koostumus, käytetyn sahatavaran lujuus ja sormijatkoksen lujuus. Taulukossa 3 on esitetty homogeenisen liimapuun lujuus ja jäykkyysarvot. Mikäli valmistaja haluaa optimoida paikallisesti saatavana olevansahatavaran käyttöä, on myös mahdollista, että hän käyttää laskennallista menetelmää tai koekuormitusta määrittääkseen oman lujuusluokan. (Suomen Liimapuu-yhdistys ja Puuinfo 2015a, 1-11, 1-12.)

Taulukko 3. Standardissa EN 14080 esitetyt homogeenisen liimapuun lujuus ja jäykkyysarvot. (Suomen Liimapuuyhdistys ja Puuinfo 2015a, 1-12.)

Standardin EN 14080 mukaiset liimapuun lujuusluokat. Yhdistetty liimapuu. Valmistaja voi myös määrittellä oman lujuusluokan. Lujuusarvot N/mm^2 ja tiheydet kg/m^3 .

Ominaisuus ^a	Merkintä	Liimapuun lujuusluokka						
		GL20c	GL22c	GL24c	GL26c	GL28c	GL30c	GL32c
Taivutuslujuus	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Vetolujuus	$f_{t,0,g,k}$	15	16	17	19	19,5	19,5	19,5
	$f_{t,90,g,k}$	0,5						
Puristuslujuus	$f_{c,0,g,k}$	18,5	20	21,5	23,5	24	24,5	24,5
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Leikkauslujuus	$f_{v,g,k}$	3,5						
	$f_{r,g,k}$	1,2						
Kimmokerroin	$E_{0,g,mean}$	10400	10400	11000	12000	12500	13000	13500
	$E_{0,g,05}$	8600	8600	9100	10000	10400	10800	11200
	$E_{90,g,mean}$	300						
	$E_{90,g,05}$	250						
Liukkerroin	$G_{g,mean}$	650						
	$G_{g,05}$	542						
	$G_{r,g,mean}$	65						
	$G_{r,g,05}$	54						
Tiheys ^b	$\rho_{g,k}$	355	355	365	385	390	390	400
	$\rho_{g,mean}$	390	390	400	420	420	430	440

^a Taulukon ominaisuudet on laskettu standardin kohdan 5.1.5 mukaisesti sen taulukon 2 mukaisille rakenteille. Jos samaan lujuusluokkaan johtaville erilaisille rakenteille saadaan eri arvot, niin on annettu pienin arvo.

^b Laskettu eri lamellivyöhykkeiden tiheyksien keskiarvona, katso standardin kohta 5.1.5.3 kappale 5.

Rakennusmateriaalien jäykkyys- ja kestävyysominaisuuden määrittellään osavarmuusluvulla. Puumateriaalien osavarmuusluvut on määritetty taulukossa 4. Lujuusominaisuuksien suunnitteluarvoa heikennetään osavarmuusluvulla. Suunnitteluarvo pienenee ominaisarvoon nähden osavarmuusluvun kasvaessa. (RIL 205-1-2009, 43.)

Taulukko 4. Suomessa käytettävien materiaalien osavarmuusluvut γ_M (Puuinfo 2011, 15.)

Perusyhdistelmät:	
Sahatavara ja pyöreä puutavara yleensä	1,4
Havusahatavara, jonka lujuusluokka \geq C35	1,25
Liimapuu, LVL	1,2
Puulevyt	1,25
Liitokset	*)
Onnettomuusyhdistelmät	1,0

Rakenne tulee suunnitella niin, että vaadittava luotettavuus saavutetaan suunnittelemalla Eurokoodien asettamien standardien mukaisesti. (RIL 201-1-2011a, 23.)

5.2 Mitoituksen perustana Eurokoodi 5

Kantavat rakenteet mitoitetaan Eurokoodi-standardien mukaisesti. Eurokoodien lisäksi kantavien rakenteiden suunnittelussa käytetään ympäristöministeriön vahvistamia Suomen kansallisia NA (National Annex) -liitteitä. Kansallisen liitteen avulla määritellään Eurokoodien soveltamista suunnittelussa niiltä osin, missä on annettu mahdollisuuksia kansallisiin valintoihin. (RIL 201-1-2011a, 13.)

Eurokoodein pääosat ovat:

- Rakenteiden suunnitteluperusteet, Eurokoodi 0, EN 1990
- Rakenteiden kuormat, Eurokoodi 1, EN 1991
- Betonirakenteiden suunnittelu, Eurokoodi 2, EN 1992
- Teräsrakenteiden suunnittelu, Eurokoodi 3, EN 1993
- Betoni-teräsliittorakenteiden suunnittelu, Eurokoodi 4, EN 1994
- Puurakenteiden suunnittelu, Eurokoodi 5, EN 1995
- Muurattujen rakenteiden suunnittelu, Eurokoodi 6, EN 1996
- Geoteknisten rakenteiden suunnittelu, Eurokoodi 7, EN 1997
- Rakenteiden suunnittelu kestävyys-suhteen maanjäristyksessä, Eurokoodi 8, EN 1998
- Alumiinirakennejärjestelmien suunnittelu, Eurokoodi 9, EN 1999 (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry).

Liimapuurakenteiden mitoituksen ja laskennan perustana on Suomessa eurokoodi 5:n asettamat vaatimukset. Eurokoodi 5:ssä käsiteltäviä puurakenteille esitettyjä vaatimuksia, joita voidaan hyödyntää liimapuurakenteissa, ovat mekaaninen kestävyys, käyttökelpoisuus, säilyvyys ja palonkestävyys. (Puuinfo 2011, 10.)

Pilaria mitoittaessa tarkistetaan momentin ja pystykuorman yhteisvaikutus. Näiden lisäksi tarkistetaan kiepahdus, leikkausvoima sekä pilarin poikkileikkaukseen mahtuva, tukimomenttia vastaava, liimaruuvimäärä. Pääkannattajan ja pilarin liitoksessa tarkistetaan tukipaine. (Puuinfo 2009a, 35, 36.)

Murtorajatilalaskentaa tehtäessä kuormitusyhdistelmissä huomioidaan mahdollisen vaurion suuruus luotettavuusluokalla. Mikäli on mahdollista, että kestävyyden menettäminen aiheuttaa suuren henkilövahingon riskin, tulee kuormakertoimelle lisätä kuormia korottava arvo. Luotettavuusluokkien mukaiset kuormakertoimet K_{FI} on esitetty taulukossa 5. (RIL 201-1-2011a, 24.)

Taulukko 5. Luotettavuusluokat RC ja kuormakertoimet K_{FI} (Suomen Liimapuu yhdistys ja Puuinfo 2015b, 10.)

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

Pilarille kohdistuu useita eri kuormia. Rakennukseen kohdistuvat kuormat on määritelty lähtötiedoissa. Näiden lisäksi pilariin vaikuttaa sen oma paino.

Useimmiten omana painona käytetään rakenneosan ominaisarvoa. Liimapuulle käytetään ominaispainoa $5,0 \text{ kN/m}^3$. Tarvittaessa valmistajalta saadaan tehdasvalmisteisille rakennusosille ominaispainot. (RIL 205-1-2009, 31.)

Erilaiset kuormien kestot vaikuttavat liimapuun mitoitukseen. Liimapuulla on parempi kesto lyhytaikaisille kuin pitkäaikaisille kuormille. Kosteuden ja kuormien vaikutukset tulee huomioida mitoituksessa muunnoskerroimella k_{mod} . Rakenteen käyttöluokalla sekä kuorman aikaluokalla on vaikutus muunnoskerroimeen. (Suomen Liimapuu yhdistys ja Puuinfo 2015a, 2-9, 2-10.)

Kuormat luokitellaan aikaluokittain pysyviin kuormiin (G) ja muuttuviin kuormiin (Q) tai onnettomuuskuormiin (A). Rakenteen kestävyyden mitoitus lasketaan kuormitusyhdistelmällä, joka antaa rakenteelle suurimman arvon. Murtorajatilan kuormitusyhdistelmät pilarin mitoituksessa lasketaan käyttäen kaavoja 3 ja 4. (RIL 201-1-2011a, 25-26.)

$$\frac{1,15}{0,9} K_{FI} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Y_P P + 1,5 K_{FI} Q_{k,1} + 1,5 K_{FI} \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} \times Q_{k,i} \quad (3)$$

yhdistelmin arvo kuitenkin vähintään

$$\left. \begin{matrix} 1,35 \\ 0,9 \end{matrix} K_{FI} \right\} \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \quad (4)$$

Mahdollisia kuormitusyhdistelmiä voi olla useita kymmeniä. Tässä opinnäyte-työssä tarkastellaan viittä kuormitusyhdistelmää normaalitilanteessa sekä kah- ta kuormitusyhdistelmää onnettomuustilanteessa. Ensimmäisessä kuormi- tusyhdistelmässä (pysyvä aikaluokka) tarkastellaan rakennuksen omasta pai- nosta aiheutuva kuormitus. Toisessa kuormitusyhdistelmässä (hetkellinen ai- kaluokka) määräävänä kuormana on tuulikuorma ja kolmannessa kuormi- tusyhdistelmässä (hetkellinen aikaluokka) on lumi. Neljännessä kuormitusyh- distelmässä (keskipitkä aikaluokka) pelkkänä kuormittavana tekijänä on aino- astaan tuuli ja viidennessä (keskipitkä aikaluokka) pelkkä lumi. Palotilannetta mitoitettaessa käytetään onnettomuustilanteen kuormitusyhdistelmiä. Kuormi- tusyhdistelmät kuusi ja seitsemän kuvaavat vaihtoehtoisia onnettomuustilan- teen kuormitusyhdistelmiä.

$$KY1 = 1,35 \times K_{FI} \times G_{Kj}$$

$$KY1 = 1,15 \times K_{FI} \times G_{Kj} + 1,5 \times K_{FI} \times Q_{kw} + 1,5 \times K_{FI} \times \Psi_{ks} \times Q_{ks}$$

$$KY3 = 1,15 \times K_{FI} \times G_{Kj} + 1,5 \times K_{FI} \times Q_{ks} + 1,5 \times K_{FI} \times \Psi_{kw} \times Q_{kw}$$

$$KY4 = 1,15 \times K_{FI} \times G_{Kj} + 1,5 \times K_{FI} \times Q_{kw}$$

$$KY5 = 1,15 \times K_{FI} \times G_{Kj} + 1,5 \times K_{FI} \times Q_{ks}$$

$$KY6 = G_{Kj} + 0,5 \times Q_{kl} + 0,3 \times Q_{kh}$$

$$KY7 = G_{Kj} + 0,2 \times Q_{kl} + 0,3 \times Q_{kh} + 0,2 \times Q_{kt}$$

Kuormitusyhdistelmissä käytetään Suomen kansallisen liitteen mukaisia yhdis- telmäkertoimia. Tuulikuormalle käytetään yhdistelykerrointa $\Psi_0 = 0,6$ ja lumi- kuormalle yhdistelmäkerrointa $\Psi_0 = 0,7$. (RIL 201-1-2011a, 49.)

Rakenteen käyttökelpoisuus ilman varmuuskertoimia mitoitetaan käyttörajati- lassa. Käyttörajatilassa tarkistetaan muun muassa värähtelyt ja siirtymät, jotka vaikuttavat käyttäjien mukavuuteen. (Carling 2003, 46.)

Kuormien vaikutuksesta aiheutuvia rakenteelle syntyviä muodonmuutoksia tarkastetaan käyttörajatilassa ilman osavarmuuslukuja. Muodonmuutosten tu-

lee pysyä riittävän pienenä. Mikäli muodonmuutokset kasvavat liian isoiksi koi-
tuvat ne haitaksi liittyville rakenteille. (RIL 205-1-2009, 27.)

Eräs muodonmuutoksen muoto on rakenteiden kokoonpuristuminen. Sitä tarkastellaan usein murtorajatilana. Eurokoodi 5:n mukaan osoitetaan, että puristuslujuus kohtisuoraan syiden suuntaan ei ylity tukipinnassa. Koska pikem-
minkin on kysymys liitoskohdan muodonmuutoksesta kuin sen murtumisesta,
on tarkastelu käytännössä käyttörajatilanomainen. (Suomen Liimapuu yhdistys
ja Puuinfo 2015a, 6-5.)

5.3 Pilarin nurjahduksen mitoitus

Nurjahdus on ilmiö, jossa puristuksessa oleva hoikka sauva taipuu sivulle, en-
nen kuin sauvan puristusmyötöraja on saavutettu. Nurjahdus on usein mää-
räävä tekijä rakenteen mitoituksessa, sillä nurjahdus tapahtuu ennen puristus-
jännityksen maksimiarvoin saavuttamista. Sauvan taipumus nurjahtaa riippuu
sauvan mitoista, sekä materiaalista että tuennasta. (Hietikko 2015, 128, 129.)

Vedossa syitä vastaan kohtisuoraan puun lujuus on alhaisimmillaan. Suunni-
teltaessa puurakenteita tulee välttää syitä vastaan kohtisuoria vetojännityksiä
tai ne tulee pitää mahdollisimman alhaisina. Vedossa puun muodonmuutos-
käyrä on lineaarinen lähes murtoon saakka. Näin ollen murtotapa on hauraus
ja vaurio äkillinen. (Valtion teknillinen tutkimuskeskus; Rakennustieto Oy
1996, B2/2.)

Puristetun sauvan nurjahdus otetaan huomioon pienentämällä puristuslujuutta
nurjahduskertoimella $k_{c,y}$ tai $k_{c,z}$ kaavojen 5 ja 6 mukaisesti. Nurjahduskerroin
 $k_{c,y}$ vastaa nurjahdusta poikkileikkauksen vahvempaan suuntaan z ja $k_{c,z}$ hei-
kompaan suuntaan y. Hoikkuusluku λ puristetulla rakenteella saa olla pysyvis-
sä rakenteissa enintään 200. Puristetun tai samanaikaisesti taivutetun ja pu-
ristetun sauvan tulee täyttää avaruusnurjahdusta koskevat mitoitus ehdot, jotka
on esitetty kaavoissa 5 ja 6 (RIL 205-1-2009, 74, 76.)

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} \leq 1,00 \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} \leq 1,00 \quad (6)$$

joissa

$\sigma_{c,0,d}$ = syynsuuntaisten puristusjännitysten mitoitusarvo

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

$k_{c,y}$ = nurjahduskerroin

$k_{c,z}$ = nurjahduskerroin

$\sigma_{m,z,d}$ =
taivutusjännityksen suunnitteluarvo y –
akselin suuntaan

$\sigma_{m,y,d}$ =
taivutusjännityksen suunnitteluarvo z –
akselin suuntaan

k_m = jännitysjakauman ja materiaalin epähomogeenisuus

kerroin: 0,7 suorakaidepoikkileikkaus liimapuulle

Pilarin kiepahduskestävyys tulee tarkastaa. On tapauksia joissa momentti vaikuttaa vahvemman akselin suuntaan sekä tapauksia joissa puristusvoima ja momentti vaikuttavat samanaikaisesti. Puristusvoiman ja momentin yhteisvaikutuksen mitoitusehto on esitetty kaavassa 7. Kaavassa huomioidaan sauvan nurjahdus ja kiepahdus. (RIL 205-1-2009, 76.)

$$\left(\frac{\sigma_{m,z,d}}{k_{crit} \times f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,0,d}}{k_{cz} \times f_{c,0,d}} \leq 1,00 \quad (7)$$

jossa

$\sigma_{m,z,d}$ =
taivutusjännityksen suunnitteluarvo y – akselin suuntaan

k_{crit} = kiepahduskerroin

$f_{m,d}$ = taivutuslujuuden suunnitteluarvo

$\sigma_{m,0,d}$ = puristusjännityksen suunnitteluarvo

$k_{c,z}$ = nurjahduskerroin

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

Pilareiden ollessa suorakaiteen muotoisia, voidaan kiepahduskestävyydessä tarvittava kriittinen taivutusvastus laskea kaavalla 8. (RIL 205-1-2009, 76.)

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \times b^2}{h \times l_{ef}} \times E_{0,05} \quad (8)$$

jossa

c = materiaalista riippuva kerroin, tässä tapauksessa 0,71

b = pilarin leveys

h = pilarin korkeus

l_{ef} = nurjahduspituus

Saavutettaessa puun puristuslujuus alkaa se plastisoitua. Tällöin jännitys, joka vastaa puristuslujuutta, vaikuttaa suuremmalla osalla poikkileikkauksen pinta-alaan. Samalla rakenne saavuttaa suuremman kestävyuden. (Suomen Liimapuuyhdistys; Puuinfo 2015a, 4-20.)

Pilarien laskennan perustana on Eulerin nurjahdusteoria. Siinä on esitetty matemaattisesti suoran, molemmista päistään nivelellisesti kiinnitetyn ja keskeisesti kuormitetun hoikan, nurjahtavan ja tasapaksun sauvan nurjahduskuorman kaava. Pilarin nurjahduspituus on nurjahtaneen muodon kahden nollakohdan välinen etäisyys. Kuvassa 5 on esitetty nurjahduspituudet eri kiinnitystapauksille. (Suomen Liimapuuyhdistys; Puuinfo 2015a, 4-13.)

Palkin nurjahdus on esitetty katkoviivalla	a)	b)	c)	d)	e)	f)
	Teoreettinen β arvo	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0
Suosittelu β arvo	0,7	0,85	1,2	1,0	2,25	2,25

Kuva 5. Teoreettiset ja käytännössä sovellettavat nurjahduspituudet eri kiinnitystapauksille. (Suomen Liimapuuyhdistys ja Puuinfo 2015a, 4-14.)

Mastopilarin mitoitusta laskettaessa Suunnitteluohje RIL 205-1-2009 mukaisesti nurjahduskertoimelle käytetään arvoa $\beta = 2,5$. (RIL 205-1-2009, 74.)

Mikäli mastopilari on kiinnitetty liimaruuveilla, voidaan yksinkertaistettuna nurjahduspituutena käyttää arvoa $\beta = 2,2$, mikäli pilarin nurjahduspituutta $2,5 \cdot L$ vastaava pilarin hoikkuus:

$$\lambda \geq \begin{cases} 120 & \text{käytettäessä teräslajin S235JRG2 liimaruuveja} \\ 100 & \text{käytettäessä lujuusluokan 5.8 liimaruuveja} \end{cases}$$

Liimapuupilarin pienin tarvittava lujuus on mahdollista määrittää Eurokoodi 5:n mukaan käyttämällä lineaarista nurjahdusteoriaa. Epälineaariset eli toisen kertaluokan vaikutukset otetaan mitoittaessa huomioon lujuuden pienennyskerroimella k_c . Jännityksen tulee täyttää kaavassa 9 esitetty ehto. (Suomen Liimapuuyhdistys; Puuinfo 2015a, 4-17.)

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \leq k_c \times f_{c,d} \quad (9)$$

jossa

$f_{c,d}$ = puristuslujuuden mitoitusarvo

A = pilarin poikkileikkauksen koko pinta – ala

k_c = nurjahduksen huomioonottava kerroin

Pilarin muunnettu hoikkuus johdetaan seuraavasti kaavan 10 avulla.

$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{P_c}{P_{cr}}} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k} \times A}{\pi^2 \times \frac{E_{0,05} \times I}{(\beta \times L)^2}}} = \frac{\lambda}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (10)$$

jossa

$f_{c,0,k}$ = puun syidensuuntaisen puristuslujuuden ominaisarvo

$E_{0,05}$ = syidensuuntaisen kimmokertoimen 5 % fraktiili

λ = pilarin hoikkuusluku

Pilarin hoikkuusluku on määritetty kaavan 11 mukaisesti.

$$\lambda_y = \frac{\beta \times L}{i_y} \quad (11)$$

jossa

i_y = hitaussäde

Hitaussäde määritellään seuraavasti käyttäen kaavaa 12.

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{b \times h}} = \frac{h}{\sqrt{12}} \quad (12)$$

jossa

I = pilarin jäyhyysmomentti tarkasteltavassa suunnassa

$$I_y = \frac{b \times h^3}{12} \quad (13)$$

jossa

$b = \text{pilarin leveys}$

$h = \text{pilarin syvyys}$

Mitoitettaessa pilaria, tulee tarkistaa, ettei puristusjännityksen ja taivutusjännityksen yhteisvaikutus ylitä liimapuun lujuutta. Pilarin nurjahdus on tarkasteltava sekä Y- että Z-akselin suhteen. Nurjahdus poikkileikkauksen hoikempaa/heikompaan suuntaa. Nurjahduskerroin (β) voidaan katsoa kuvasta 5. (Suomen Liimapuuyhdistys; Puuinfo 2015a, 4-2, 4-14.)

Kiinnitettäessä alapää jäykästi perustuksiin tai peruspilariin liimaruuviliitoksen avulla, on mahdollista määrittää nurjahduspituus L_c kaavan 14 avulla. (Finnish Wood Research 2014, 14.)

$$L_c = L \times \beta \quad (14)$$

jossa

$L = \text{pilarin pituus}$

$\beta = \text{nurjahduskerroin}$

$$\beta = \sqrt{4 + \frac{\pi^2 \times E_{0,05} \times I}{L \times K_{r,u}}} \quad (15)$$

jossa

$E_{0,05} = \text{liilmapuun kimmomoduulin ominaisarvo}$

$\text{puun syiden suuntaan}$

$I = \text{pilarin jäyhyysmomentti tarkastettavassa suunnassa}$

$K_{r,uc} = \text{liimaruuvien siirtymäkerroin aksiaalisessa}$

kuormituksessa

$$K_{r,uc} = \frac{2}{3} \times K_{ser} \times \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (16)$$

jossa

$$K_{ser} = \begin{cases} 180\,000 \text{ N/mm} & \text{teräslajin S235JRG2 liimaruuveilla} \\ 285\,000 \text{ N/mm} & \text{lujuusluokan 5.8. liimaruuveilla} \end{cases}$$

n = liimaruuvien lukumäärä koko liitoksessa

r_i = liimaruuvien etäisyys pilarin neutraaliakselilta

Mikäli sauvan nurjahdusta ei oteta huomioon, voidaan sauvan puristuskestävyys tarkistaa kaavan 17 mitoitusehdon mukaisesti. (RIL 205-1-2009, 66.)

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (17)$$

jossa

$\sigma_{c,0,d}$ = syynsuuntainen puristusjännityksen suunnitteluarvo

$f_{c,0,d}$ = syynsuuntainen puristuslujuuden suunnitteluarvo

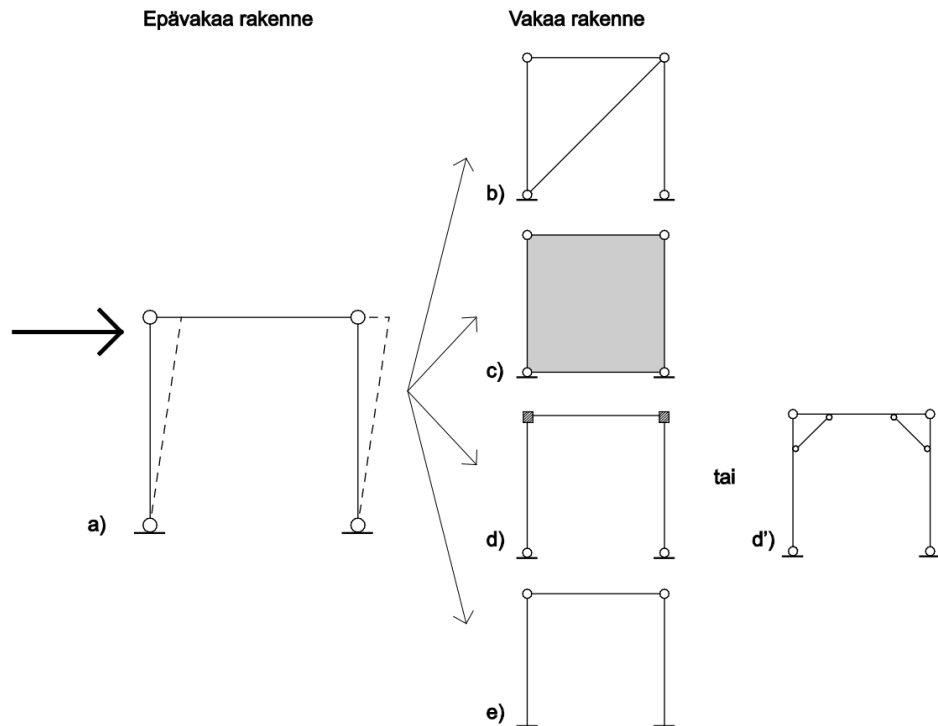
Nurjahdus tulee kuitenkin huomioida. Tarkistus tehdään kaavoissa 5 ja 6 esitettyjen ehtojen mukaisesti. Kaavoissa 5 ja 6 on esitetty yhdistetty puristus- ja taivutuskestävyys. Kaavoissa huomioidaan nurjahduksen vaikutus sekä y-akselin että z-akselin suuntaan. Kaavoissa esitetyn mitoitusehdon tulee täyttyä (RIL 205-1-2009, 74.)

5.4 Pilarin jäykkyyden vastaavuus

Rakennukseen kohdistuu perustason suuntaisia vaakavoimia. Erilaisia kaatavien voimien aiheuttajia ovat tuulikuormat, maanjäristykset, törmäyskuormat sekä liikkuvien koneiden ja nosturipalkeista pilareille välittyvät jarrutusvoimat. Vaakavoimia voi aiheutua pilareiden ja palkkien epäkeskeisyydestä. (Suomen Liimapuuyhdistys; Puuinfo 2015a, 13-2.)

Rakenteen vakauden ylläpidon suunnittelu on rakennesuunnittelijan tärkeimpiä tehtäviä. Pilari-palkkirakenne on mahdollista jäykistää monin eritavoin. Ku-

vassa 6 on esitetty kehän suuntaisen jäykistämisen perustapaukset, joista on mahdollista tehdä erilaisia muunnelmia.



Kuva 6. Pilari-palkkirakenteen jäykistäminen kehän suunnassa (Suomen Liimapuuyhdistys ja Puuinfo 2015a, 13-2.)

Sivusuuntaiset muodonmuutokset tulee olla rajoitettuja. Mikäli liimapuupilarin jäykkyyden tulisi vastata vanhan teräsbetonipilarin jäykkyyttä ja mitoitus olisi tehty kestämään rungon osalta vain minimirasitukset, olisi myös tarkasteltava rasituksen jakautuminen kehän kaikille pilarille samalla tavoin kuin ennen yhden pilarin vaihtoa. Kun pilarin tuentatapa ja pituus oletetaan pysyvän samana, niin kyse on pilariprofiilien kimmomodulien ja jäyhyysmomenttien tulojen vertaamisesta toisiinsa ($E \times I$) käyttäen kaavoja 13 ja 18. (Ahtiainen 2016.)

Teräsbetonipilarin kimmomuoduli on esitetty kaavassa 18. Kimmomuoduli (RIL 202-2011b, 22.)

$$E_{cm} = 22\,000 \text{ MPa} \times \left(\frac{f_{ck} + 8 \text{ MPa}}{10 \text{ MPa}} \right)^{0,3} \quad (18)$$

jossa

$$f_{ck} = \text{betonin puristuslujuus}$$

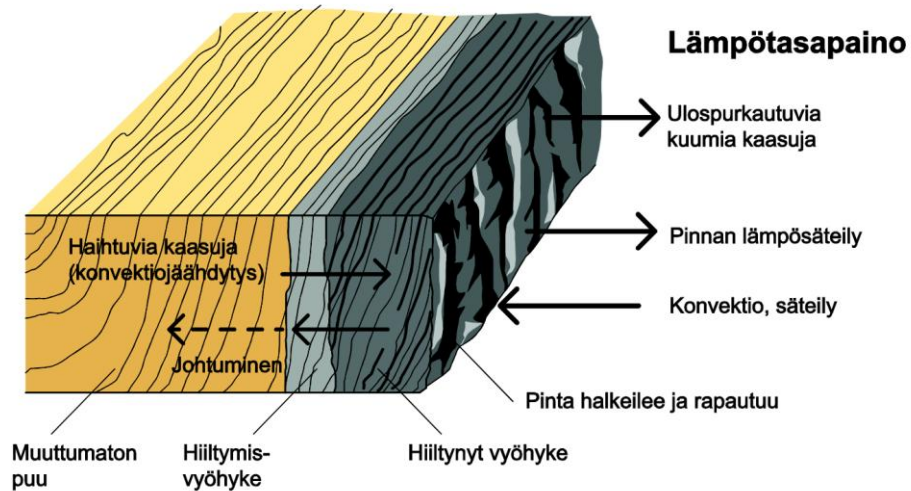
Pilarien jäykkyyden vastaavuutta ei tässä opinnäytetyössä lasketa. Oletuksena on, että rakennuksen runko on mitoitettu niin että yksittäisen pilarin vaihdon ei oleteta aiheuttavan merkittävää muutosta rakenteissa.

5.5 Pilarin palotekninen mitoitus

Ensimmäinen mitoituksessa huomioitava asia on vaadittava paloluokka. Rakennuksen paloluokaksi on määritetty P1 (R90). Puurakenteinen pilari on mahdollista mitoittaa palotilannetta varten joko suojaamattomana tai palosuojattuna rakenteena. Suojaamattomassa rakenteessa puun hiiltymisen tapahtuu palon alusta lähtien. Jotta vaaditun palonkestoajan jälkeen rakenteen poikkileikkauksessa on riittävästi hiiltymätöntä puuta palotilanteen rasituksia varten, voidaan rakenne ylimitoittaa tehollisen hiiltymissyvyyden verran. (Puuinfo 2013a, 1.)

Palomitoitus tehdään onnettomuustilanteen mukaisilla kuormitusyhdistelmillä. Liimapuun lujuus- ja jäykkyysominaisuudet on mahdollista korottaa kertoimella $k_{fi}=1,15$. Onnettomuustilanteen kuormien aiheuttamat rasitukset lasketaan kuormitusyhdistelyllä. Käyttämällä kuormituskertoimia palotilanteelle saadaan pienemmät kuormat kuin normaalilämpötilassa. (RIL 205-1-2009, 190, 238, 239.)

Palaessaan puu hajoaa. Paloprosessi ei ole räjähdysmäinen eikä palon eteneminen palolle alttiilta pinnoilta sisäänpäin tapahtuu määrättyllä äärellisellä nopeudella. Puun lämmönjohtavuus on huono, minkä takia palon aikana suuri osa lämmöstä siirtyy palokaasujen mukana pois puusta. Kuvassa (7) esitetty hiiltymisen hidastaa palon etenemistä. Hiiltymissyvyys on verrannollinen palonaikana tapahtuvaan aikaan, jona hiiltymistä tapahtuu. (Suomen Liimapuu-yhdistys ja Puuinfo 2015a, 15-4.)

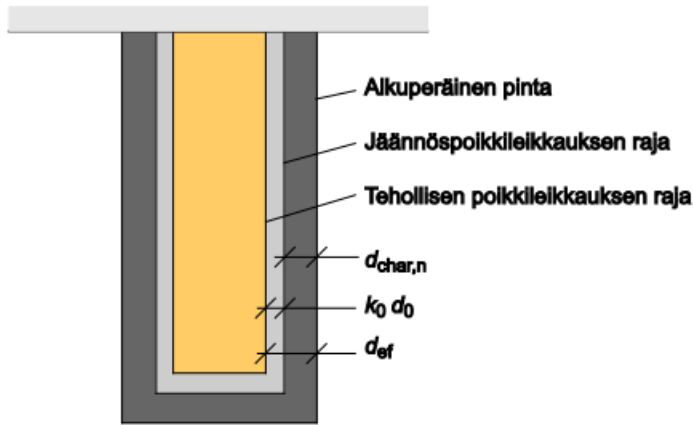


Kuva 7. Hiiltymisprosessi (Suomen Liimapuuyhdistys ja Puuinfo 2015a, 15-4.)

Rakenteen palotekninen mitoitus on mahdollista suunnitella joko niin että rakenne suunnitellaan palon vaikutusta kestäväksi tai niin että rakenteen kestävyys palotilanteessa arvioidaan laskennallisesti. (Suomen Liimapuuyhdistys ja Puuinfo 2015, 15-1.)

Liimapuupilarin palotekninen suunnittelu vaatii tarkkuutta. Vaadittavan paloluokan ollessa parempi kuin R30 tulee mitoitus tehdä huolellisesti, sillä poikkileikkauksen kestävyys on riippuvainen hoikkuusluvusta, joka kasvaa nopeasti hiiltymisen edetessä. Kestävyyden pieneneminen pitää ottaa huomioon palotilanteessa kasvattamalla liimapuupilarin mittoja. (Suomen Liimapuuyhdistys ja Puuinfo 2015a, 15 - 20.)

Liimapuupilari mitoitetaan suojaamattomana rakenteena. Mitoitus tehdään tehollisen poikkileikkauksen menetelmällä. Tehollinen poikkileikkaus saadaan vähentämällä alkuperäisestä poikkileikkauksesta tehollisen hiiltymissyvyyden d_{ef} verran kaikilta palolle alttiilta sivuilta kuvan 8 mukaisesti. Tulee kuitenkin huomioida, että hiilikerroksessa sekä lähellä hiiltymisrajaa olevassa puukerroksessa, joka jää tehollisen poikkileikkauksen ja hiiltymisrajan väliin, lujuus- ja jäykkyysominaisuuksien oletetaan olevan nolla. Liimapuun nimellinen hiiltymisnopeus, sisältäen kulmapyöritykset sekä halkeamat, on 0,70 mm minuutissa. Tehollinen hiiltymissyvyys d_{ef} lasketaan kaavalla 19. (RIL 205-1-2009, 240, 242, 243.)



Kuva 8. Jäännöspoikkileikkaus ja tehollinen poikkileikkaus EN 1995-1-2 mukaan (Suomen Liimapuuyhdistys ja Puuinfo 2015a, 15-7.)

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \times d_0 \quad (19)$$

jossa

$d_{char,n}$ = hiiltymissyvyys, nimellisen hiiltymissyvyyden

mitoitusarvo

$d_0 = 7 \text{ mm}$ (vyöhyke, jossa lujuus on voimakkaasti alentunut)

k_0 = kerroin, tarkasteltaessa paloaikaa

(tässä tapauksessa kerroin on 1)

Poikkileikkaus pienenee kulmissa. Nimellisen hiiltymänopeuden mitoitusarvo on esitetty kaavassa (20). Mitoitusarvon suuruuteen sisältyy halkeamien sekä kulmapyöristysten vaikutus. (Puuinfo 2011, 45.)

$$d_{char,n} = \beta_n \times t \quad (20)$$

jossa

β_n = hiiltymisnopeuden mitoitusarvo, liimapuulle 0,7mm/min

t = paloaika (min)

Palon kesto vaikuttaa hiilymissyvyyden laskentaan. Palon kestäessä kauemmin kuin 20 minuuttia, kuten tässä tapauksessa, oletetaan että k_0 kertoimen arvo on 1. Palon keston ollessa alle 20 minuuttia muuttuu kertoimen arvo lineaarisesti arvosta 0 arvoon 1 ajan muuttuessa arvosta 0 arvoon 20 minuuttia. Kaavassa (19) esitetty d_0 on jäännöspoikkileikkauksen ja tehollisen poikkileikkauksen mittojen suurin poikkeama toisistaan. (Suomen Liimapuu yhdistys ja Puuinfo 2015a, 15-8.)

Tehollinen jäännöspoikkileikkauspinta-ala pienenee hiilymisen edetessä. Hiilymämitoitusta tehtäessä tulee huomioida, että kuvassa 8 esitetystä $k_0 d_0$ -kerroksessa lujuus- ja jäykkyysominaisuuksien oletetaan olevan nolla. Jäljelle jäävälle, eli teholliselle poikkileikkaukselle käytetään normaalilämpötilan lujuus ja jäykkyysarvoja. (RIL 205-1-2009, 31.)

5.6 Pilarin kosteustekniset ominaisuudet

Puurakenteen kosteussuojaus tehdään ensisijaisesti rakenteellisesti. Puu eristetään perusrakenteista kosteuden katkaisevalla materiaalilla käyttämällä rakenteiden välissä kumibitumikermikaistaa tai rakentamalla puurakenteen ja muun rakenteen väliin tuulettuva ilmarako. Puurakenteen liittymät on suunniteltava siten, että puun kuivuminen on mahdollista kaikissa tilanteissa. Mahdollisissa riskialttiissa rakenteissa, joissa kuivuminen ei ole aina mahdollista, käytetään kyseessä olevan riskiluokan mukaan käsiteltyä puuta. (Puuinfo 2009a, 44.)

Sääolosuhteet vaikuttavat puun mitoitukseen. Puun kosteusliikkeet sekä kosteusluokan mukaiset kertoimet on huomioitava ulkona säälle alttiiden puurakenteiden mitoituksessa. Puun kosteuspitoisuudesta aiheutuva muodonmuutos, käsittäen puun kutistumisen ja turpoamisen, on kosteuspitoisuuden (p-%) muutoksen yksikköä kohti keskimäärin: syyn suunnassa noin 0,013 % ja syyn poikkisuunnassa noin 0,133 %. Puun kosteuspitoisuuden ollessa noin 30 p-% puun solujen seinämät saavuttavat kyllästymispisteen ja puun kosteusmuodonmuutokset loppuvat. Kuivan puun (kosteuspitoisuus noin 10 p-%) kastuessa täysin märäksi syyn suuntainen kosteusmuodonmuutos on enintään noin 2,7 mm/100 m ja vastaavasti turpoama syyn poikkisuuntaisesti on enintään noin 2,7 mm/100 mm. (Puuinfo 2009a, 45.)

Suunniteltaessa ja rakennettaessa puurakenne siten, että se on suojattu kastumiselta ja sitä ympäröivän ilman kosteuspitoisuus on aina enintään 85 %, ei puun kosteuspitoisuuden vaihtelu vaikuta puun lujuusarvoihin ja näin ollen puun paksuuden tai pituuden muutoksia ei tarvitse ottaa huomioon. (Puuinfo 2009a, 44.)

Muutokset pituuden suhteen ovat yleensä hyvin pieniä. Niitä ei tarvitse ottaa huomioon muissa kuin hyvin suurissa rakenteissa. On kuitenkin mahdollista, että erilaiset kosteusliikkeet lämpimällä ja kylmällä sivulla saattavat aiheuttaa merkittäviä muodonmuutoksia rakenteissa. (Carling 2003, 66.)

5.7 Pilarin yläpään tukipinta

Pilarin tulee täyttää siltä vaadittava tukipinta. Normaalivoima aiheuttaa pilarille syynsuuntaisen puristuksen. Pilarille palkeilta tulevan kuorman kautta voidaan määritellä siltä vaadittava tukipainepinnan ala. Tukipinnan pinta-ala määritellään kaavan 20 avulla. Syynsuuntaisen puristuksen tulee täyttää kaavassa 21 esitetty ehto. (RIL 205-1-2009, 66, 79.)

$$\sigma_n = \frac{N_d}{A} \quad (20)$$

jossa

$$\sigma_N = \textit{normaalijännitys}$$

$$(\sigma_{c,0,d} = \textit{syynsuuntaisen puristusjännituksen arvo})$$

$$N_d = \textit{normaalivoima}$$

$$A = \textit{poikkileikkausala}$$

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (21)$$

jossa

$\sigma_{c,0,d}$ = syynsuuntaisen puristusjännityksen arvo (σ_N)

$f_{c,0,d}$ = puristuslujuuden mitoitusarvo syynsuuntaisessa puristuksessa

Pilarin tukipintaa on mahdollista parantaa. Palkeilta tulevan tukipaineen kasvaessa liian suureksi pilariin nähden, voidaan pilarin poikkileikkausta kasvat-
taa. Kapasiteettia voidaan myös lisätä käyttämällä palkin ja pilarin välissä
paksua lattaterästä. (Carling 2003, 161.)

6 PILARIN LIITOKSET

Liitoksia tarkastellaan niiden rakennusteknisten vaatimusten ja liitosteknisten ominaisuuksien näkökulmasta. Liitosten on siirrettävä rakennuksen runkoon kohdistuvia kuormituksia rakenteiden välillä. Liitosten rakennustekniset vaatimukset ovat: Lujuusopillinen toiminta, palotekninen toiminta, kosteustekninen toiminta ja säilyvyys. Pilarin liitoksien suunnitteluperustana ovat Eurokoodi 5:n sekä Suomen rakentamismääräyskokoelman osan B10 määrittelemät vaatimukset. Täyttämällä edellä mainittujen määritelmien vaatimukset täyttyvät myös liitoksien lujuusopillinen toiminta.

Pilari-palkkirungoissa on kehän suunnassa tyypillisesti mastopilarit. Rakennuksen katon pääkannattimet on asennettu mastopilarien varaan. Päädyissä on joko jäykkä- tai nivelkantaiset tuulipilarit sekä näiden varaan asennetut jänneväliiltään lyhyemmät ja sitä hoikemmat päätypalkit. Mikäli yläpään liitoksessa sekä pilari että palkki ovat liimapuuta, on liitoksen yleinen toteutus tapa hankolautaliitos. Pilarin alapään liitos perustuksiin toteutetaan normaalisti joko pulteilla tai hitsaamalla. (Puuinfo 2009a, 18.)

Päämääränä liitosten suunnittelussa tulee olla poikittaisten jännitysten rajoittaminen syyn suuntaan nähden. Liitos tulee sijoittaa niin, että syyn suuntaan nähden poikittaiset jännitykset alenevat, mikäli voima vaikuttaa syyn suunnasta poikkeavassa kulmassa. Liitoksen tulee sijoittaa niin että rakennusosan reuna- ja päätyetäisyyden toteutuvat. Halkeilemisen rajoittaminen ja välttäm-

nen ovat oleellinen osa liitosten suunnittelua, joten sidottua aluetta tulee rajoittaa. Rakenteellisen lopputuloksen kannalta on parempi, että liitos on mahdollisimman yksinkertainen ja näin ollen liitoksessa tarvittavien liittimien määrä vähäinen. Aina kun mahdollista, liitokset ja rakenneosat tulee sijoittaa rakenteessa keskeisesti ja symmetrisesti. (Kurkela1996, C1/7-8.)

Liitokset ovat alttiita korroosiolle. Niihin vaikuttavaa korroosiota on mahdollista estää ruostesuojaamalla teräsosat tai käyttämällä korroosiota kestäviä metalleja. Suunniteltaessa liitoksia, on tarkasteltava metallien sopivuutta puunsuoja-aineiden kanssa. Tulee myös noudattaa erityistä varovaisuutta käytettäessä alumiinisia tai kuparia sisältäviä teräsosia suoja-aineilla käsitellyn puun kanssa. (Kurkela1996, C1/9-10.)

Kosteus aiheuttaa liitokselle omat vaatimuksensa. Kosteuden muutoksesta johtuvan puu tyssähtymisen tai halkeilun vuoksi liitokset pitää suunnitella niin, että tavalliset kosteusmuodonmuutokset estyvät mahdollisimman vähän. Elleivät liitokset ole tiukkoja, niiden jäykkyys ja kestävyys huononevat. Puun kuivuttua tulee tärkeimmät ruuviliitokset jälki kiristää. On myös mahdollista, että liitosten kosteusteknisetliikkeet muuttavat voimien siirtymistä rakenteessa. Rakenteen käytön aikana onkin tarpeellista tarkistaa ja tarvittaessa kiristää liitoksia. (Suomen Liimapuuyhdistys ja Puuinfo 2015a, 6-21.)

6.1 Liitosten teräsosat

Liitoksissa käytettävät teräsosat suunnitellaan Eurokoodin mukaisesti. Liitosten teräsosien kestävyys on Eurokoodi 5:ssa edellytetty tarkistettavan teräsraakenteiden suunnittelustandardin Eurokoodi 3 mukaan. On mahdollista, että teräsosien kestävyys ylittyy vedon, puristuksen, leikkauksen, taivutuksen tai näiden yhdistelmän vuoksi, tai puuosien reunapuristuslujuus voi ylittyä. Teräsosien vetomurtuma pitää tarkastella sekä koko teräsosan poikkileikkauksen, että nettopoikkileikkauksen osalta. (Suomen Liimapuuyhdistys ja Puuinfo 2015a, 14-9.)

Liimapuupilarit kiinnitetään jäykästi perustuksiin liimaruuviliitoksen avulla. Liitoksissa käytetään lujuusluokan 5.8 liimaruuveja. Näin ollen liimaruuvien siirtymäkertoimen arvo (K_{ser}) aksiaalisessa kuormituksessa on 285 000 N/mm. (Finnish Wood Research 2014, 14.)

6.2 Pilarin alapään liitoksen mitoitus

Liimapuupilarin alapään liitoksessa hyödynnetään vanhaa teräsbetonipilaria. Mahdolliset liitostavat ovat pilarin liitos käyttäen hyödyksi olemassa olevaa an-turan peruspultti liitosta tai katkaista olemassa oleva teräsbetonipilari ja tehdä jäykkäliitos siihen. Opinnäytetyössä on päädytty tarkastelemaan vaihtoehtoa, jossa olemassa oleva pilari katkaistaan lattiapinnan tason yläpuolelta ja näin ollen välttyään mahdollisista maapinnan alapuolisilta pilarin alapäähän kohdis-tuvilta kosteusrasituksilta.

Pilari on mahdollista liittää peruspilariin joko pultti- tai hitsiliitoksella. Näin saa-daan aikaan jäykkä liitos pilarin ja perustuksen välille. Jäykkä liitos välittää pi-larin tukivoimat ensin pilarilta liimaruuveilla teräsosalle, josta voimat välitetään edelleen joko hitsaus- tai pulttiliitoksella peruspilarille. Pilarin pulttiliitos voi-daan tehdä joko käyttäen tavanomaisia peruspultteja tai erityisesti puupilareille suunniteltuja pilarikenkiä. Peruspultteja käytettäessä pilarin alapäähän liitetään erityinen teräслиitososa. (Puuinfo 2009a, 32.)

Liitoksessa voidaan soveltaa liimaruuviliitoksen toimintaa ja mitoitusperiaattei-ta. Ruuvien dimensiot, määrä ja liimauspituudet määritetään huomioimalla vaakavoimat ja mahdollisesti nostavat pystyvoimat. Liimaussyvyyden tulee olla niin suuri, että ruuvi plastisoituu ennen liimauksen pettämistä. Vertikaalisesti suuntautuvat pystyvoimat voidaan siirtää perustuksiin pintapuristuksen kautta. Pilariin liimatun ruuvin mitoitusehto on esitetty kaavassa 22. (Carling 2003, 146.)

$$\left(\frac{F_v}{R_{v,d}}\right)^2 + \left(\frac{F_t}{R_{t,d}}\right)^2 \leq 1 \quad (22)$$

jossa

$$F_v = \frac{H_d}{n}$$

$$F_t = \frac{V_d}{n}$$

H_d = vaakavoiman laskenta – arvo pilaria kohden

V_d = (nostava) pystyvoiman laskenta – arvo pilaria kohden

n = liimattujen ruuvien lukumäärä pilaria kohden

R_{vd} = ruuvien leik. kest. laskettuna voimassa olevien

normien mukaisesti

R_{td} = ruuvien vetokestävyys voimassa olevien

normien mukaan

”Liimatankoliitoksissa käytetään valmistajakohtaisesti hyväksytyjä liimoja, valmistustekniikoita ja laadunvarmennusmenettelyjä.” (RIL 205-1-2009, 127.)

Vedettyjen tankojen mitoituksessa on mahdollista käyttää mitoittavana lukuarvona materiaalin vetomurtolujuutta. Hyödynnettävä vetomurtolujuuden arvo ei voi olla enimmillään kuin $f_{u,k} = 800 \text{ N/mm}^2$. Puristettujen tankojen mitoituksessa käytetään 0,2-rajan minimiarvoa f_y tai materiaalin myötölujuutta. Liimasauman ominaistartuntalujuuden mitoitus on esitetty kaavassa 23. (RIL 205-1-2009, 128.)

$$f_{ak} = 6,5 \times \left(1 - \frac{L_a}{100d}\right) \quad (23)$$

jossa

d = tangon paksuus

L_a = tartuntapituus puussa

Mikäli tanko on liimattu syynsuuntaan, kerrotaan tartuntalujuus luvulla 0,75.

Liitokset tulee suunnitella niin että vedetyt terästangot myötäävät. Tartuntapituudet vedettyjen tankojen osalta tulee olla niin pitkiä, että mitoittavan aikaluokan tartuntakestävyuden mitoitusarvoa $R_{a,d}$ vastaava vetojännitys täyttää kaavan 24 ehdon. (RIL 205-1-2009, 128.)

$$\sigma_{s,t,d} = \frac{R_{a,d}}{\frac{1}{4}\pi \times d^2} \geq f_y \quad (24)$$

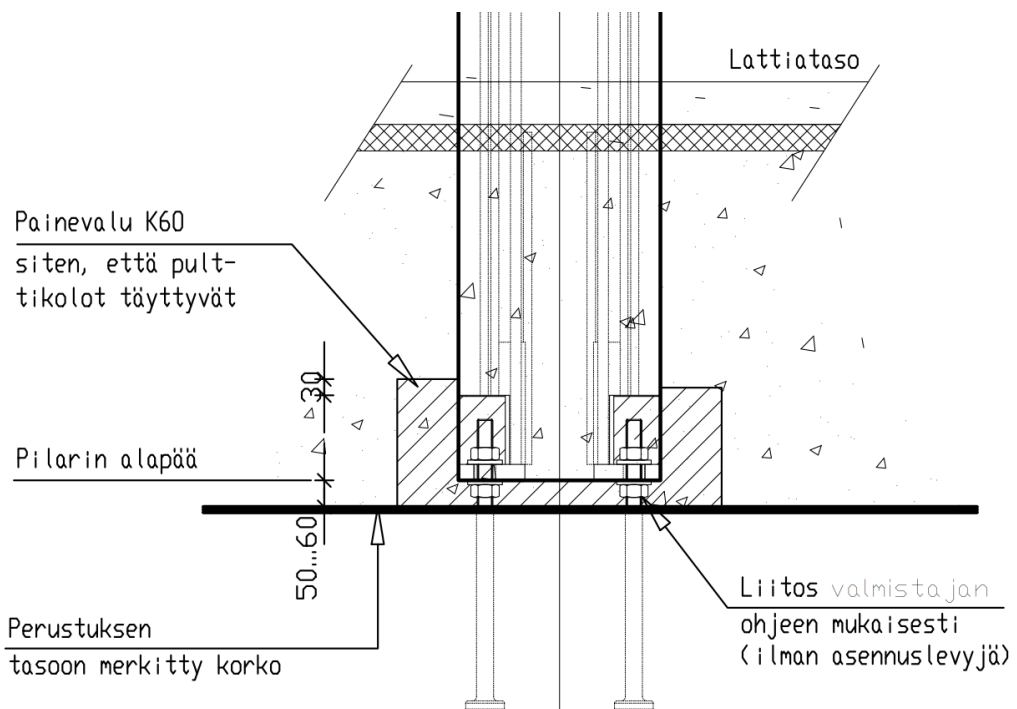
jossa

$d = \text{tangon paksuus}$

$f_y = \text{tangon myötölujuus tai } 0,2 - \text{rajan minimiarvo}$

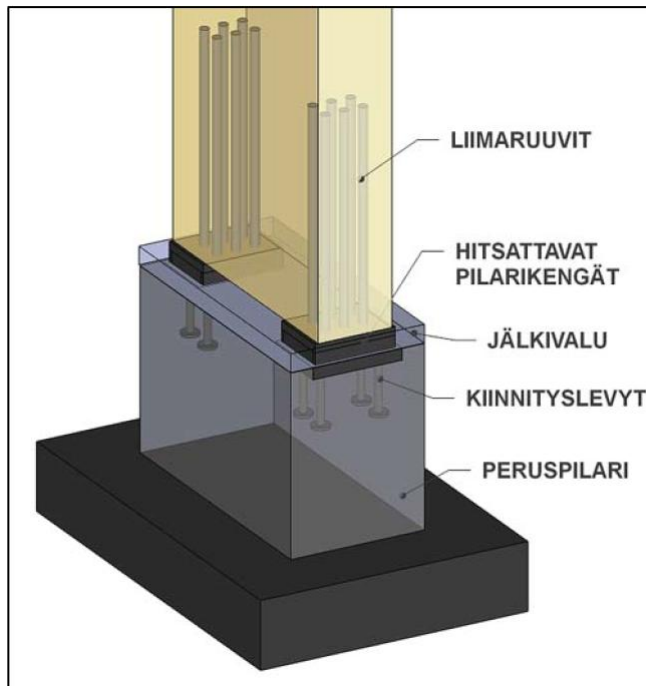
$R_{a,d} = \text{vetojäännitys}$

Teräsbetoni pilari on jäykästi kiinnitetty perustuksiin. Liitoksessa ei todeta olevan rakennusteknisiä puutteita. Uuden liitoksen tullessa lattiatason yläpuolelle, ei ole olemassa olevalle liitokselle tehdä mitään. Kuvassa 9 on esitetty liitos perustuksiin.



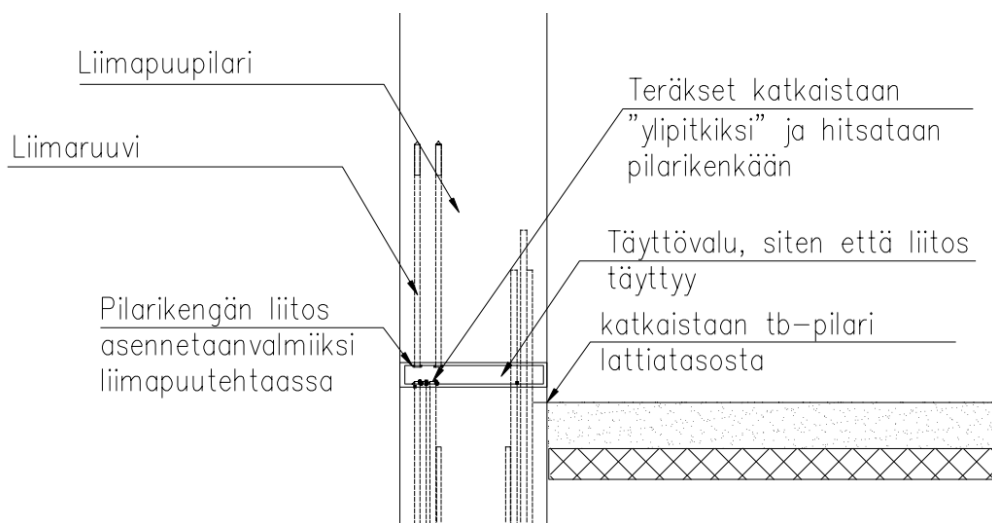
Kuva 9. Olemassa olevan pilarin alapään kiinnitys perustuksiin

Uusi liimapuupilarin alapään liitos suunnitellaan tehtäväksi lattiatason yläpuolelle, jolloin liimapuupilarin alapään liitoksessa sovelletaan hitsattavan pilari-kengän liitoksen periaatetta kuten kuvissa 10 ja 11 on esitetty.



Kuva 10. Periaatekuva hitsattavasta pilarikengäliitoksesta (Puuinfo 2012, 2.)

Kuvassa 10 esitettyssä liitoksessa on mahdollista käyttää joko yhtä koko pilarin alapinnan kokoista tai kahta pienempää pilarikengää. Hitsaamalla koottu pilarikengä kiinnitetään liimaruuveilla pilarin alapintaan. Pilarikengä kiinnitetään peruspilariin hitsaamalla. Liitosten mitoitus sekä hitsien mitoitus tehdään ta-pauskohtaisesti. (Puuinfo 2012, 2.)

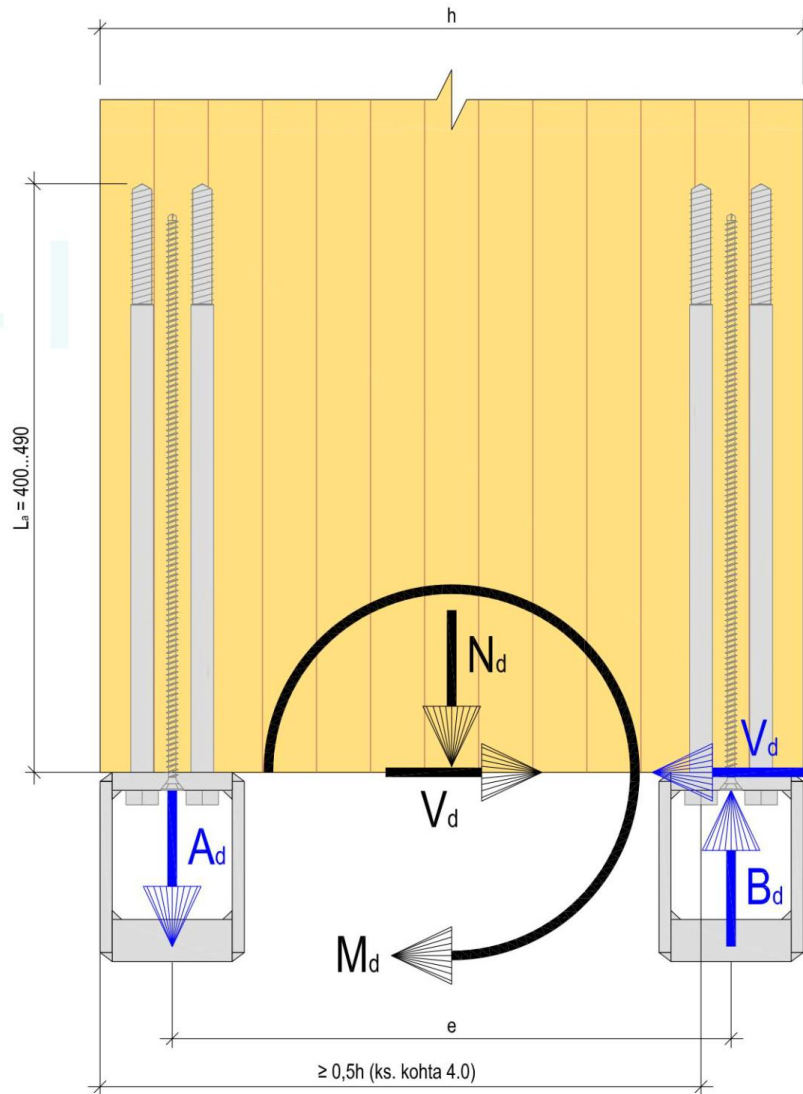


Kuva 11. Liimapuupilarin kiinnitys teräsbetonipilariin

Pilarin alapään liimaruuviliitoksella on jälkivalun sisällä olevan liitoksen vuoksi hyvä palonkesto ja näin ollen täyttääkin yleensä liitokselta vaaditut palonkesto-vaatimukset ilman erillistä palosuojausta. Pilarin alapään liitoksessa tulee huomioida kosteussuojaus ja pilarissa tapahtuva kosteuden kapillaarinen nousu. Mahdollinen lattialla oleva kosteus ei saa vaikuttaa pilariin, joten tämä on huomioitava liitoksen korkojen suunnittelussa. Pilarin tulee saada kuivua. (Puuinfo 2012, 3.)

Liimaruuvit ja -tangot liimataan tehtaalla. Käytettäessä epoksi- tai polyuretaaniliimalla syiden suuntaisesti, liimapuuhun jonka lujuusluokka on vähintään GL30c ja rakennuksen käyttöluokan ollessa 1 tai 2, liimattuja kansiruuveja jotka ovat kärkiosaltaan 100 – 150 mm:n pituudelta kierteistettyjä ja joiden sileän osan halkaisija on 19 mm tulee sileän osan syvyydelle porata 20 mm reikä ja tämän reiän pohjaan porata 16 mm reikä niin että ruuvin tartuntasyyvyys vastaa reiän kokonaissyvyyttä. Liimaruuvien, joiden lujuusluokka on 5.8, kohdalla käytetään aina epoksiliimaa. (Finnish Wood Research 2015, 4.)

Liimaruuveja voidaan käyttää perustuksiin hitsattavan tai ruuvattavan teräslevyn kanssa. Mitoitettaessa liimaruuveja, tulee huomioida kuvan 12 mukaisesti pilarin aksiaalinen kuormitus, leikkauskuormitus sekä momentti, joka jaetaan voimapariin. Pilarin liitos välittää veto- ja puristusvoimia. Pilarin alapään liitokseen kohdistuva vetovoima lasketaan kaavalla 25 ja vastaavasti puristusvoima kaavalla 26. Vedosta aiheutuvat voimat siirtyvät liitoksen ruuvien kautta. Puristusvoima voi siirtyä joko ruuvien kautta tai puristusaineena. Mitoitusrivo $R_{ax,d}$ liimaruuvien normaaliarvolle lasketaan kaavan 27 avulla. (Finnish Wood Research 2015, 4.)



Kuva 12. Liimaruuviliitos (Finnish Wood Research 2015, 4.)

$$A_d = \frac{M_d}{e} - \frac{N_d}{2} \quad (25)$$

$$B_d = \frac{M_d}{e} + \frac{N_d}{2} \quad (26)$$

joissa

M_d = Momentin mitoitusarvo

N_d = Normaalivoiman mitoitusarvo

e = momenttivarsi, puristu –

ja vetoterästen painopisteiden etäisyys

Liimaruuvien normaalivoimakkestävyyden mitoitusarvo $R_{ax,d}$

$$R_{ax,d} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{R_{y,k}}{\gamma_{M,y}} \\ k_{mod} \times \frac{R_{a,k}}{\gamma_M} \end{array} \right. \quad (27)$$

jossa

$R_{y,k}$ = ruuvien myötökestävyyden ominaisarvo

(101 kN, lujuusluokka 5,8)

$\gamma_{M,y}$ = ruuvien myötäämisen osavarmuusluku (1,1)

k_{mod} = muunnoskerroin liimapuulle

$R_{a,k}$ = ruuvien tartuntakestävyyden ominaisarvo

$R_{a,k} = \left(\frac{L_a}{490} \right) \times 84 \text{ kN}$, ruuvien lujuusluokan ollessa 5.8

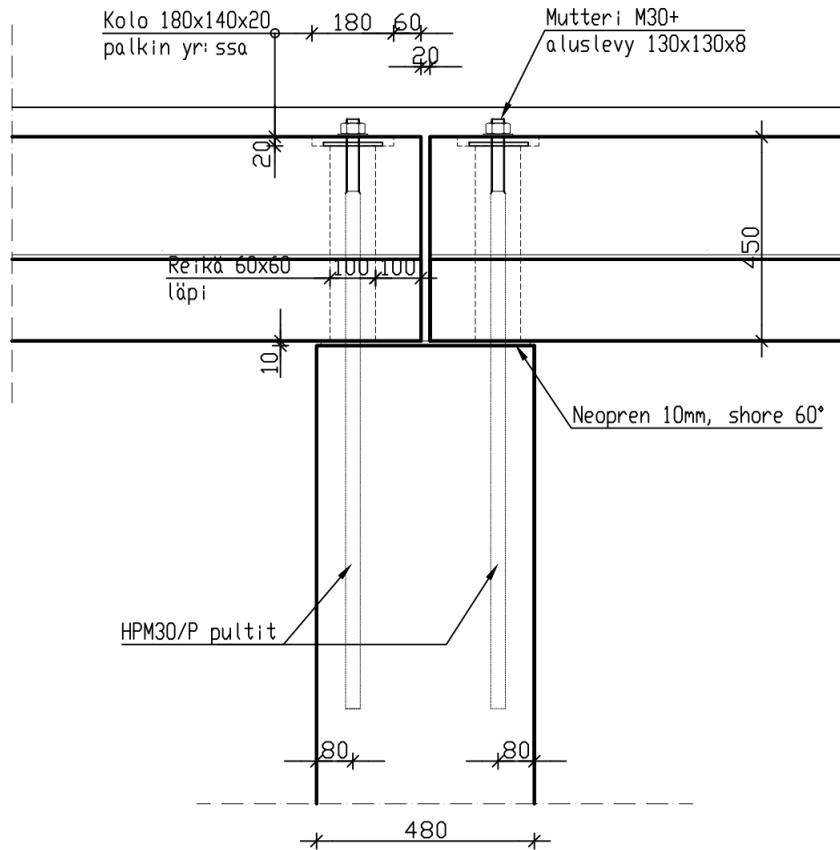
(käyttöluokka 1)

Uusi pilarikenkä on mahdollinen toteuttaa joko mallia LPK tai se voidaan toteuttaa kahdella pohjalevyllä ja liimaruuveilla. Pohjalevyyn tehdään reiät peruspulteille sekä liimaruuveille. Liitos suojataan saumabetonilla. Vaatimuksena on, että liitos täyttövaluineen tulee olla kutistumaton. Pilarirakenteiden lopullinen jäykkyys ja lujuus saavutetaan vasta liitoksen betonoinnin jälkeen.

Saumabetonia käytettäessä liitoksessa, tulee pintojen välinen liike olla estetty sauman kovettumiseen saakka. (Leskelä 2008, 536.)

6.3 Pilarin yläpään liitoksen mitoitus

Pilarin yläpään liitos pyritään toteuttamaan olemassa olevan liitoksen mukaisesti. Suunnittelussa tulee perehtyä betonielementtien sekä betoni- ja liimapuelementtien välisten liitosten suunnitteluperusteisiin. Kuvassa 13 on esitetty pilarin yläpäässä sijaitseva betonielementtien välinen liitos.



Kuva 13. Pilarin yläpään liitos

Hyödynnettäessä aikaisempaa liitostekniikkaa, korvataan pilarin pultit liimaruuveilla. On otettava huomioon, ettei liimaruuvi jäykistä palkkia sivusuunnassa ja näin ollen palkin tuennasta tulee huolehtia muulla tavalla. Liimaruuvien antama sivutuenta on riittämätön. (Suomen Liimapuuyhdistys ja Puuinfo 2015a, 14-30.)

Sivutuenta voidaan tehdä upottamalla teräsbetonipalkit pilariin. Tässä tapauksessa on luontevampaa tehdä se liimaruuveilla kiinnitetyillä lattarautoilla, jotka pultataan kiinni teräsbetonipalkkiin sen molemmille puolille. Tuentatapa on hankolaitaliitoksen kanssa yleinen liimapuusta valmistettujen pilarien ja palkkien liitostapa. Kiinnitysteräokset, pultit ja mutterit tulee olla palosuojattuja. (Elo-ranta 2016.)

Pääkannattajan ja pilarin liitoksessa tarkistetaan tukipaine. Mikäli tukipaineen alentaminen on tarpeen, voidaan pilarin poikkileikkausta suurentaa koko pilarin mitalla tai käyttää kannattajan alapintaan ankkuroitavaa teräsosaa. On myös mahdollista liimata tarpeellinen määrä lamelleja pilarin yläpäähän. (Puuinfo 2009a, 36.)

Pilarin yläpään kohdistuu syynsuuntainen puristus, jolloin kaavassa 28 esitetyn ehdon tulee täyttyä. (RIL 205-1-2009, 66, 79.)

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} \leq f_{c,0,d} \quad (28)$$

jossa

$\sigma_{c,0,d}$ = *syynsuuntaisen puristusjännityksen mitoitusarvo*

(normaalijännitys)

N_d = *normaalivoima*

A = *poikkileikkausala*

$f_{c,0,d}$ = *puristuslujuuden mitoitusarvo syynsuuntaisessa*

puristuksessa

Pilarin yläpään ja palkin välinen liitos tehdään usein nivelellisenä. Liitos siirtää pystysuoria ja vaakasuoria voimia mutta ei taivutusmomenttia. Vakiokiinnikkeiden käyttö on harvinaista, sillä liimapuukurakenteet ovat usein suuria. (Suomen Liimapuuyhdistys; Puuinfo 2015a, 14-21.)

Nurjahduskestävyys saattaa heikentyä ylisuurten sivuttaisliikkeiden johdosta. Pilarin yläpään liitoksen ollessa sivusuunnassa kiinnittämätön, kasvaa sen nurjahduspituus huomattavasti. Pilarin ollessa nivelellisesti kiinnitetty perustuksiin ja sen huipun voidessa liikkua vapaasti sivusuunnassa lähenee pilarin nurjahduspituus ääretöntä eikä rakenne ole vakaa. (Suomen Liimapuuyhdistys; Puuinfo 2015a, 13-9, 13-31.)

Ylimääräisten jännitteiden syntymistä tulee liitoksessa välttää. Jännitteiden seurauksena voi liimapuupilariin syntyä ennakoimattomia vaurioita. Yksinkertainen ja käyttökelpoinen tapa liittää liimapuupilari teräsbetonipalkkiin on käyttää pilarin sivuun kiinnitettäviä lattateräksiä. Voimien siirto kiinnitysteräksestä liimapuupilariin voidaan toteuttaa naulan tai pultin välityksellä. Jotteivat palkin mahdolliset kulmamuuutokset esty, tulee kiinnitysteräket sijoittaa liitoksen molemmiin puolin, mahdollisimman lähelle pilarin sisäreunaa. Mitoitettaessa tulee

ottaa huomioon, että kiinnitysteräs on kiinnitetty pilariin nivelellisesti ja palkkiin jäykästi. (Carling 2003, 156.)

Jottei pystysuuntaisten kuormien siirto palkilta liimapuupilarille tapahdu rakenteiden läpi menevän pultin välityksellä, on kiinnitysteräksen pulttien reiät tehtävä pystysuunnassa pitkänomaisiksi. Pulttien ja kiinnityslevyn tarkoitus on siirtää ainoastaan sellaisia vaakavoimia, jotka pyrkivät siirtämään palkin pilarin päältä. Palkilta pilarille suuntautuvat pystyvoimat ja palkkia pilaria vasten puristavat vaakavoimat siirtyvät pilarille pintapuristuksena. Palkin ja pilarin pintapuristuksen mitoitusehto on esitetty kaavassa (29). (Carling 2003, 156.)

$$V_d \leq f_{c90d} \cdot d \cdot h \quad (29)$$

jossa

V_d = (alaspäin suuntautunut) laskentapystyvoima

f_{c90d} = liimapuupalkin laskentapuristuslujuus kohtisuoraa

syyn suntaa vastaan

b = pilarin leveys

h = pilarin korkeus

Elementin pituus vaihtelee lämpö- ja kosteusliikkeiden seurauksena. Elementin tuen detalji tulee suunnitella niin, että estetään elementin putoamien tuelta liitoksella jonka voima vastaa tukipintojen kitkavoimien oletettua erotusta. Liitoksen mitoittaminen tuettavan elementin suuntaiselle voimalle on esitetty kaavassa 30. Kiinnitystä ei tarvitse tehdä suuremmalle voimalle kuin 150 kN tai mitä elementtiä tukena toimiva rakenne kestää. Kiinnitysvoima, pilari- palkki-liitoksessa voi määräytyä pilarin kapasiteetin perusteella. (Suomen Betonteollisuus ry 2012, 17.)

$$F_d = k \times V_k$$

(30)

jossa

V_k = elementin tukireaktion ominaisarvo

k = liitospintoihin vaikuttavien kitkakertoimien erotuksen arvo

Liitospintojen kitkakertoimien erotuksen arvot ovat:

$k = 0,2$ kun liitoksessa on kuminen tasauslevy, kumilevylaakeri tai vastaava

$k = 0,3$ kun molemmat liitospinnat ovat terästä

$k = 0,4$ kun liitospinnassa on teräs betonipintaa vasten

$k = 0,5$ muissa tapauksissa.

Liitoksissa käytettävien liittimien koot, sijoittelu, liitinväli, reuna- ja päätyetäisyydet tulee valita niin, että liitokselta vaadittu kestävyys ja jäykkyys on mahdollista saavuttaa. Mikäli liitoskuormia siirretään samassa liitoksessa erityyppisillä liittimillä, tulee liittimien erilaiset jäykkyydet sekä niiden voimien jakautumisen vaikutus ottaa huomioon. Puuosiin asennettavien pulttien minimivälit ja reunaetäisyydet on ilmoitettu taulukossa 6. (Puuinfo 2011, 28.)

Taulukko 6. Pulttien minimivälit ja reunaetäisyydet puuosissa (Puuinfo 2011, 38.)

		Sahatavara, liimapuu	Kerto-S-LVL
a_1	Syysuuntaan	$(4+ \cos\alpha)d$	$(4+3 \cos\alpha)d$
a_2	Syitä vastaan kohtisuorasti	$4d^{(3)}$	$4d^{(3)}$
a_{3a}	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max(7d ; 80 \text{ mm})$	$\max(7d ; 105 \text{ mm})$
a_{3c}	$90^\circ < \alpha < 150^\circ$	$(1+6 \sin\alpha)d$	$(1+6 \sin\alpha)d$
	$150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$	$4d$	$4d$
	$210^\circ < \alpha < 270^\circ$	$(1+6 \sin\alpha)d$	$(1+6 \sin\alpha)d$
a_{4a}	$0^\circ < \alpha < 180^\circ$	$\max([2+2\sin\alpha]d ; 3d)$	$\max([2+2\sin\alpha]d ; 3d)$
a_{4c}	$180^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	$3d$	$3d$

7 VÄLIAIKANEN TUENTA

Puutteellinen suunnittelu saattaa johtaa vaaratilanteisiin. Kantavien rakenteiden tuennat tulee suunnitella ennen pilarin vaihtoon ryhtymistä. Ennen kuin olemassa oleva pilari voidaan purkaa, on huolehdittava, että purettavan pilarin kannatteleville palkeille on rakennettu väliaikaiset kannatusrakenteet.

Rakennesuunnittelija vastaa tuentasuunnitelman tekemisestä. Väliaikainen tuenta tulee tehdä aina, rakennesuunnittelijan määrittämän, tapauskohtaisen tuentasuunnitelman mukaisesti. Rakennesuunnittelija määrittää tarpeen tuennalle sekä tuentatavan. Mahdollisten työnaikaisten ongelmien ilmaannuttua, työmenetelmiä muutetaan. Tuentojen muutoksista tulee aina sopia rakennesuunnittelijan kanssa. Tuentasuunnitelmassa esitetään eri kuormitusilanteissa tuettavat kuormat, tuentapisteet, tuentakalusto ja tuentapiirustus. Suunnitelmasta on käytävä ilmi kaluston sijoittaminen sekä tuentajärjestyksen ja tuentasuunnitelman liittyminen purkutyösuunnitelmaan. (Rakennustieto 2011, 4.)

Tuentasuunnitelmassa tulee määrittää, miten työ tehdään niin, että kaikissa työvaiheissa kuormia kantavat rakenteet tulee tuetuksi. Purkutyön vaikutukset rakenteen kuormitukseen tulee ottaa huomioon tuennan suunnittelussa. Rakenteisiin tulee merkitä tuentapaikat. (Rakennustieto 2011, 4.)

Kun uudet kantavat rakenteet tai pysyvät tukirakenteet on rakennettu, voidaan väliaikaiset tuet purkaa. Tuennat tulee poistaa aina varovasti tukirakennetta löysäämällä. Tuetun kuorman liian äkkiäistä siirtymää uusille tuille tulee välttää. Irrrottaminen on mahdollista tehdä ruuveilla, kiiloilla, hiekkalaatikotuilla tai tukirakennetta vähitellen heikentämällä. (Rakennustieto 2011, 9.)

Työaikainen tuenta voidaan tehdä palkin reikiin porattavilla täkkipulteilla. Lopullinen liitoksen kiinnitys tehdään palkin molemmille puolille asennettavilla lattateräksillä. (Eloranta 2016.)

8 PILARIN VAIHTO

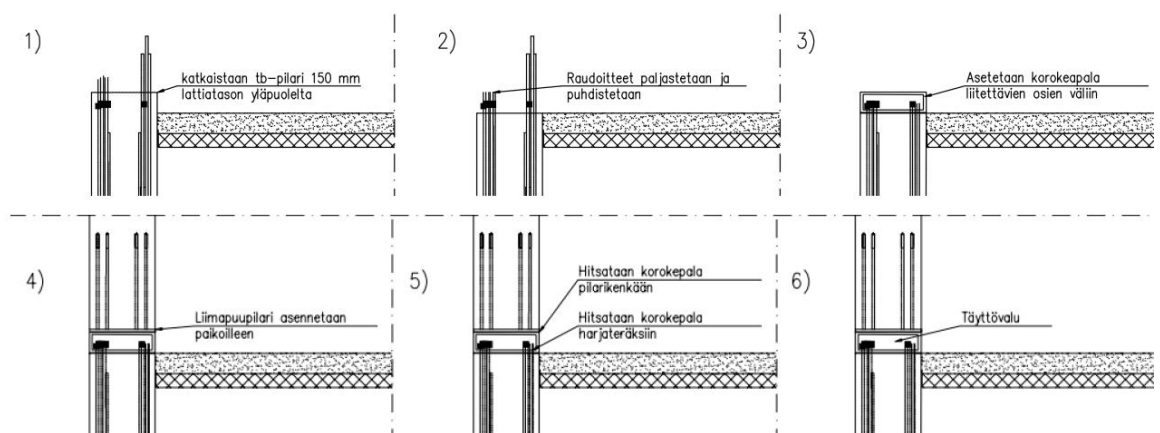
Uuden pilarin jälkiasennus tulee olla mahdollisimman helppoa ja turvallista. Mikäli mahdollista käytetään ennestään liitoksissa käytettyjä sekä markkinoilla

olemassa olevia vakio-osia. Oletuksena on, että ennen pilarin vaihtotyön aloittamista, palkit on tuettu tuentasuunnitelman mukaisilla väliaikaisilla tuilla.

Pilarin vaihdon työvaiheet:

1. Teräsbetonipilari katkaistaan noin 150 mm lattia tason yläpuolelta.
2. Raudoitteet paljastetaan ja puhdistetaan lattiatasoon saakka
3. Lattateräksestä valmistettu korokepala asetetaan lepäämään vapaasti teräsbetonipilarin päälle.
4. Liimapuupilari asennetaan ja tuetaan paikoilleen. Mikäli on tarvetta, voidaan tässä vaiheessa lyhentää raudoitusta.
5. Korokepala asennetaan pilarin pohjaa vasten ja hitsataan kiinni sekä yläpuoleiseen pilariin että raudoitteisiin. Tässä vaiheessa pilarin tehdään myös yläpään kiinnitys.
6. Korokepala ja mahdollisesti korokepalan ja teräsbetonipilarin väliin jäävä osuus valetaan täyteen betonilla. Täyttövalun tulee olla kutistumaton.

Työvaiheet on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Pilarin vaihdon työvaiheet

9 PÄÄTELMÄT

Teräsbetonipilari on mahdollista korvaaminen liimapuusta valmistetulla pilarilla. Opinnäytetyön tuloksena syntyi mahdollinen tapa toteuttaa pilarin vaihto. Liitteessä 1 esitetään teräsbetonipilarin korvaavan liimapuupilarin mitoitus käsin laskentana.

Jotta suunnitteluperusteiden ja – ohjeiden käyttö olisi luontevaa, tulisi suunnittelijalla olla hyvät suunnittelun yleistiedot. Suunnittelijalta vaaditaan syvempää perehtymistä puu-, betoni-, ja teräsrakenteiden suunnitteluun sekä niiden hybridimaiseen käyttöön samassa rakennuksessa. Hybridiluonteisten rakennusprojektien yleistyminen vaatii niin tilaajan, rakentajan kuin suunnittelijan yhteistä tahtoa ja ennakkoluulotonta ajattelumallia viedä projekti samaan maaliin. Kaavojen ja määräysten käyttö vaatii suunnittelijalta harjaantuneisuutta.

Korjausrakentamiseen liittyvät suunnittelutehtävät voivat olla haastavia. Tässä työssä suunnittelun haastavaksi teki uuden rakenteen liittäminen vanhaan jo olemassa olevaan rakenteeseen. Samalla tämä työ osoittaa myös sen, että rakenteita on mahdollista korvata toisilla materiaaleilla. Korvattaessa teräsbetonipilari liimapuupilarilla, tulee huomioida mahdolliset materiaalista ja poikkeileikkausmitoista aiheutuvat muutokset liitoksissa sekä pilareihin liittyvissä rakenteissa.

Mielestäni erilaisia korjausrakentamisen ratkaisumalleja olisi syytä tarkastella ja kehittää ennakkoluulottomasti. Ei ole olemassa vain yhtä ja ainoa oikeaa tapaa toteuttaa pilarin vaihtoa. On enemmän kysymys siitä mitä halutaan ja ollaan valmiita suunnittelemaan ja tekemään. Tarkastelemalla asioita normaalisti poikkeavalla tavalla avamme mahdollisuuksien ovia kohti parempia ratkaisuja. Tämän työn tärkein anti on toimia innoittajana ja haastaa suunnittelijat sekä rakentajat, että rakennuttajat kehittämään prosesseja ympäristöystävällisempään suuntaan.

LÄHTEET

- Ahtiainen, T. suunnittelija. Johacon Oy. Haastattelu 5.3.2016. Riihimäki
- Carling, O. 2003. Liimapuu-käsikirja. Helsinki: Wood Focus Oy / Suomen Liimapuu yhdistys ry
- Elementtien liitosdetaljit. Insinööritoimisto SRT Oy 11.10.2013
- Eloranta, T. johtava konsultti. Päijät-Suunnittelu Oy. Haastattelu 6.10.2016. Lahti
- Hammond, G. & Jones, G. 2008. Inventory of carbon & energy (ICE) version 1.6a. Bath: University of Bath. Saatavissa:
<http://perigordvacance.typepad.com/files/inventoryofcarbonandenergy.pdf>
[viitattu 31.3.2016]
- Finnish Wood Research. 2014. HalliPES 1.0 Osa 3: Runkotyypit. Saatavissa:
http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/hallipes-10/hallipes_1.0_osa_3_runkotyypit.pdf [viitattu 9.1.2016]
- Finnish Wood Research. 2015. HalliPES 1.0 Osa 14: Voimaliitokset. Saatavissa:
http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/HalliPES_1%20Osa_14_Voimaliitokset%202.12..pdf [viitattu 28.2.2016]
- Hietikko, E. 2015. Lujuuslaskennan perusteet. Helsinki. Otava
- Kurkela, J. Lahtinen, R. Muilu, J. Mäki-Ketelä, L. 1996. Puurakenteet. Suunnitteluperusteet - materiaaliominaisuudet - rakenneosat – liitokset. Helsinki. Rakennustieto Oy.
- Leskelä, M. 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Helsinki. Suomen Betoniyhdistys ry
- Lindberg, R. 1994. Runkorakenteiden korjaus- ja muutostyöt. Teoksessa Kaironen, J-A (toim.) Rakennusten korjaustekniikka ja talous. Helsinki: Rakennustieto
- Puuinfo Oy. 2009a. Puuhallin rakenteet. Esisuunnittelu ja valintaperusteet. Saatavissa:

<http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/puuhallin-rakenteet-esisuunnittelu-ja-valintaperusteet/090202-puuhallin-rakennesuunnittelu.pdf> [viitattu 1.4.2016]

Puuinfo Oy. 2009b. RT Ympäristöseloste. Liimapuu. Saatavissa:

<http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/ymparistoselosteet/liimapuu.pdf> [viitattu 21.3.2016]

Puuinfo Oy. 2010. EC5 Sovelluslaskelmat. Hallirakennus. Saatavissa:

<http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/eurokoodit-ja-standardit/ec5-sovelluslaskelmat-hallirakennus/ec5-sovelluslaskelmat-hallirakennustoinen-painos.pdf> [viitattu 6.1.2016]

Puuinfo Oy. 2011. Puurakenteiden suunnittelu Lyhennetty suunnitteluohje.

Kolmas painos Eurokoodi 5. Lähde: RIL 205-1-2009 liite B. Saatavissa:

<http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/eurokoodi-5-lyhennetty-ohje-puurakenteiden-suunnittelu/eurokoodi-5-lyhennetty-ohje-puurakenteiden-suunnittelu/eurokoodi5lyhennettysuunnitteluohjewwwkolmaspainos10913rilinkorjauksin.pdf> [viitattu 29.2.2016]

Puuinfo. 2012. Tekninen tiedote. 10.7.2012. Pilarin alapään liimaruuviliitos.

Saatavissa:

<http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/pilarin-alapaan-liimaruuviliitos/pilarinalapaanliimaruuviliitos.pdf> [viitattu 2.1.2016]

Puuinfo Oy. 2013a. Tekninen tiedote. Puurakenteen palomitoitus. Saatavissa:

<http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/puurakenteen-palomitoitus/puurakenteenpalomitoitus.pdf> [viitattu 12.3.2016]

Puuinfo Oy. 2013b. Tiedote. 14.5.2015. Puutuotteiden CE-merkintä laajenee.

Saatavissa:<http://puuinfo.fi/tiedote/puutuotteiden-ce-merkinta-laajenee> [viitattu 28.12.2015]

Rakennustieto Oy. 2011. Ratu 81-0378. Väliaikainen tuenta. Menetelmät ja menekit. Saatavissa:

<https://www.rakennustieto.fi/kortistot/ratu/kortit/0378.html.stx> [viitattu 7.9.2016]

Stambej, A. Tarri, M. Heilä, S. Mattila, P. Lyytikä, A. Korjaustieto.fi. Korjaushanke. 2015. Saatavissa:

<http://www.korjaustieto.fi/taloyhtiot/korjaushankkeet.html>. [viitattu 5.1.2016]

Suomen Betoniteollisuus ry. 2012. Betoninormikortti 23. Saatavissa: [file:///C:/Users/Omistaja/Downloads/Normikortti_23%20\(3\)%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/Omistaja/Downloads/Normikortti_23%20(3)%20(3).pdf) [viitattu 12.3.2016]

Suomen Liimapuuuyhdistys ry ja Puuinfo Oy. 2014. Liimapuu-käsikirja. Osa 1. Saatavissa: <http://www.liimapuu.fi/7> [viitattu 1.6.2016]

Suomen Liimapuuuyhdistys ry ja Puuinfo Oy. 2015a. Liimapuu-käsikirja. Osa 2. Saatavissa: <http://www.liimapuu.fi/7> [viitattu 6.6.2016]

Suomen Liimapuuuyhdistys ry ja Puuinfo Oy. 2015b. Liimapuu-käsikirja. Osa 3. Saatavissa: <http://www.liimapuu.fi/7> [viitattu 3.8.2016]

Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Eurokoodit. 2015. Saatavissa: <http://www.sfs.fi/aihealueet/eurokoodit> [viitattu 3.12.2015]

RIL 205-1-2009. 2009. Puurakenteiden suunnitteluohje, yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, 1995-1-1. Helsinki: Hansaprint Oy. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL Oy.

RIL 201-1-2011. 2011a. Suunnittelunperusteet ja rakenteiden kuormat, eurokoodi EN 1990, EN 1991-1-1, EN 1991-1-3, EN 1991-1-4. Tammerprint Oy. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

RIL 202-2011. 2011b. Suomen betoniyhdistys ry. RIL 202-2011. Betonirakenteiden suunnitteluohje EC 2. Saarijärven Offset Oy. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

UPM Timber. 2016. Saatavissa:

<http://timber.upm.com/FI/ymparisto/hiilijalanjalki/mika-on-hiilijalanjalki/Pages/default.aspx> [viitattu 28.1.2016]

Valtion teknillinen tutkimuskeskus ja Rakennustieto Oy. 1996. STEP 1. Puurakenteet. Tampere. Rakennustieto Oy.

KYAMK
Rakennustekniikka, opinnäytetyö
Liimapuupilarin mitoitus

Mikko Vuontila

Lähtötiedot:

Teräbetonista valmistettu mastopilari korvataan liimapuusta valmistetulla pilarilla. Pilarissa käytettävä materiaali on liimapuu GL30c. Tässä tarkastelussa hallin sisäpinnoille ei lasketa kohdistuvan paineita.

Pitää laskea käänteisesti tai arvailla ja todeta arvausten olevan hyviä. Tulosten tulee päätyä pilarin leveyden ja korkeuden määrittämiseen.

Pääasiallinen käyttötarkoitus	logistiikka- ja varastorakennus
Seuraamusluokka	CC2
Paloluokka	P1 (R90)
Pääasiallinen rakennustapa	Paikalla rakentaminen
Korkeus (vapaa)	8,0 m
Rakennuksen korkeus	11,5 m
Rakennuksen rungon leveys	34,2 m
Ala	4 468 brm ²
Tilavuus	37 950 m ³

Laskennassa käytettävät standardit ja ohjeet:

Puurakenteet: Eurokoodi 5

Soveltamisohje: RIL 205-1-2009, RIL 201-1-2011

Pilariin vaikuttavat kuormat:

Pysyvät kuormat (G_k)	358 kN
Lumikuorma maassa (s_k)	2,75 kN/m ²
Tuulikuorma harjalla (q_{w1})	5,44 kN
Tuulikuorma seinälle (q_{w2})	2,88 kN/m

Liimapuupilarin GL30c ominaislujuudet

Taivutuslujuus	$f_{m,k} = 30,0 \text{ N/mm}^2$
Leikkauslujuus	$f_{v,k} = 3,5 \text{ N/mm}^2$
Puristuslujuus	$f_{c,0,k} = 25,0 \text{ N/mm}^2$
Kimmomoduuli	$E_{0,mean} = 13\,000 \text{ N/mm}^2$
Liukumoduuli	$G_{0,mean} = 650 \text{ N/mm}^2$
Materiaalin osavarmuusluku	$\gamma_m = 1,2$
Virumaluku	$k_{def} = 0,6$

Kuormat:

Pilarille kohdistuvat normaalivoimat:

$$N_{gk} = 358 \text{ kN}$$

$$H_{qk} = 226 \text{ kN}$$

Seinän tuulikuorma / yläpohjan osuus murtorajatilassa

$$F_{wd} = q_{wd} \times (H - L) = 2,89 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times (11,5 \text{ m} - 9,55 \text{ m}) = 5,64 \text{ kN}$$

Ominaislumikuorma katolle

$$q_k = \mu_i \times s_k = 0,8 \times 2,75 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 2,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Mastopilarin nurjahduspituus:

$$L_c = \beta \times L = 2,5 \times 9,55 \text{ m} = 23,875 \text{ m}$$

Kuormitusyhdistelmät:

KY1 Rakenteiden oma paino

$$= 1,35 \times K_{FI} \times G_{Kj} = 483,3 \text{ kN}$$

KY2 Tapaus jossa tuulikuorma on määräävä

$$= 1,15 \times K_{FI} \times G_{Kj} + 1,5 \times K_{FI} \times Q_{kw} + 1,5 \times K_{FI} \times \Psi_{ks} \times Q_{ks} = 698 \text{ kN}$$

KY3 Tapaus jossa lumikuorma on määräävä

$$= 1,15 \times K_{FI} \times G_{Kj} + 1,5 \times K_{FI} \times Q_{ks} + 1,5 \times K_{FI} \times \Psi_{kw} \times Q_{kw} = 779,9 \text{ kN}$$

KY4 Tapaus jossa pelkkä lumikuorma

$$= 1,15 \times K_{FI} \times G_{Kj} + 1,5 \times K_{FI} \times Q_{sw} = 461 \text{ kN}$$

KY5 Tapaus jossa pelkkä tuulikuorma

$$KY5 = 1,15 \times K_{FI} \times G_{Kj} + 1,5 \times K_{FI} \times Q_{ks} = 750 \text{ kN}$$

Normaalitilanteessa mitoittava kuormitusyhdistelmä on KY3

Laskennassa käytetään pilarille tulevien kuormien N_d :lle arvoa 779,88 kN

$$KY6 = G_{Kj} + 0,5 \times Q_{kl} + 0,3 \times Q_{kh} = 471,19 \text{ kN}$$

$$KY7 = G_{Kj} + 0,2 \times Q_{kl} + 0,3 \times Q_{kh} + 0,2 \times Q_{kt} = 404,56$$

Palotilanteessa mitoittava kuormitusyhdistelmä on KY6

Lasketaan pilarin taivutusmomentti murtorajatilassa y-suuntaan sekä z-suuntaan.

Taivutusmomentti y-suuntaan

Tuulesta aiheutuva tasainen kuorma

$$M_{d1} = \frac{5 \times q_{wd} \times L^2}{16} = \frac{5 \times 2,89 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times (9,55 \text{ m})^2}{16} = 82,60 \text{ kNm}$$

Tuulesta kattoon kohdistuva pistekuorma

$$M_{d2} = \frac{F_{wd} \times L}{2} = \frac{5,44 \text{ kN} \times 9,55 \text{ m}}{2} = 25,976 \text{ kNm}$$

Kuormat yhteensä: Tasainen kuorma + pistekuorma

$$M_{zd} = M_{d1} + M_{d2} = 108,67 \text{ kNm}$$

Pilarin taivutusmomentti z-suuntaan (murtorajatilassa)

$$M_{yd} = \frac{F_{d1z} \times L}{2} = \frac{3,12 \text{ kN} \times 9,55 \text{ m}}{2} = 14,90 \text{ kNm}$$

Pilarin leikkausvoima (murtorajatilassa)

$$V_d = \frac{(4 \times q_{wd} \times L)}{5} + \frac{F_{wd}}{2} = \frac{(4 \times 2,89 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \times 9,55 \text{ m})}{5} + \frac{5,64 \text{ kN}}{2} = 27,72 \text{ kN}$$

Jotta voidaan jatkaa laskemista eteenpäin, on "arvattava" pilarin poikkileikkausmitat. Aloitetaan kokeilu mitoilla, mitkä ovat lähellä teräsbetonipilarin poikkileikkausmittoja (480 mm x 480 mm).

Kokeilemalla päädytään mitoitustarkastelu tekemään ns. "optimaalisilla" arvoilla $b=514$ mm ja $h=600$.

Pilarin mitat

Leveys $b = 514$ mm

Korkeus $h = 600$ mm

Poikkileikkaus pinta-ala $A = 308\,400$ mm²

Puristuslujuus GL30c liimapuulle

$$f_{c,0,d} = \frac{(f_{c,0,k} \times k_{mod})}{\gamma_M} = \frac{(25 \frac{N}{mm^2} \times 1,1)}{1,2} = 22,92 \text{ N/mm}^2$$

kh-kerroin

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

ehto

$$k_h \leq 1,1$$

Taivutuslujuus

$$f_{m,y,d} = k_h \times \frac{(f_{m,k} \times k_{mod})}{\gamma_M} = 1 \times \frac{30 \frac{N}{mm^2} \times 1,1}{1,2} = 27,5 \text{ N/mm}^2$$

Leikkauslujuus

$$f_{v,y,d} = \frac{f_{v,k} \times k_{mod}}{\gamma_M} = \frac{3,5 \frac{N}{mm^2} \times 1,1}{1,2} = 3,21 \text{ N/mm}^2$$

Puristuskestävyys (on myös pilarin yläpään tukipaine kestävyys)

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} = \frac{779\,884 \text{ N}}{308\,400 \text{ mm}^2} = 2,53 \text{ N/mm}^2$$

Puristuskestävyyden mitoitusehto

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d}$$

Käyttöaste

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} = \frac{2,53}{22,92} = 0,11 \rightarrow 11 \%$$

Taivutuskestävyys Y-suuntaan

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{6 \times M_{zd}}{b \times h^2} = \frac{6 \times 108\,670\,000 \text{ N/mm}}{514 \text{ mm} \times (600 \text{ mm})^2} = 3,52 \text{ N/mm}^2$$

kh-kerroin

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

$$f_{m,z,d} = k_h \times \frac{f_{mk} \times k_{mod}}{\gamma_M} = 1 \times \frac{30 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times 1,1}{1,2} = 27,5 \text{ N/mm}^2$$

Taivutuskestävyyden mitoitusehto

$$\sigma_{m,z,d} \leq f_{m,y,d}$$

Käyttöaste

$$\frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{3,52}{27,5} = 0,128 \rightarrow 12,8 \%$$

Taivutuskestävyys Z-suuntaan

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{6 \times M_{yd}}{h \times b^2} = \frac{6 \times 14\,898\,000 \text{ N/mm}}{514 \text{ mm} \times (600 \text{ mm})^2} = 0,56 \text{ N/mm}^2$$

kh-kerroin

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

$$f_{m,y,d} = k_h \times \frac{f_{mk} \times k_{mod}}{\gamma_M} = 1 \times \frac{30 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times 1,1}{1,2} = 27,5 \text{ N/mm}^2$$

Ei kaupalliseen käyttöön

Taivutuskestävyyden mitoitusehto

$$\sigma_{m,y,d} \leq f_{m,y,d}$$

Käyttöaste

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{0,56}{27,5} = 0,02 \rightarrow 2,0 \%$$

Leikkauskestävyys Y- ja Z-suuntaan

$$\tau_d = 1,5 \times \frac{V_d}{A} = 1,5 \times \frac{24,86 \text{ kN}}{308 \ 040 \text{ mm}^2} = 0,121 \text{ N/mm}^2$$

Mitotusehto

$$\tau_d \leq f_{v,y,d}$$

Käyttöaste

$$\frac{\tau_d}{f_{v,y,d}} = \frac{0,121 \text{ N/mm}^2}{3,21 \text{ N/mm}^2} = 0,038 \rightarrow 3,8 \%$$

Nurjahduskestävyys (Y-suuntaan)

Jähyysäde

$$I_z = \frac{(b \times h^3)}{12} = \frac{(514 \text{ mm} \times (600 \text{ mm})^3)}{12} = 9,25 * 10^9 \text{ mm}^4$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = \sqrt{\frac{9,25 * 10^9 \text{ mm}^4}{308 \ 040 \text{ mm}^2}} = 173,21 \text{ mm}$$

Pilarin hoikkuus

$$\lambda_z = \frac{L_{cy}}{i_z} = \frac{23 \ 875 \text{ mm}}{173,21 \text{ mm}} = 137,84$$

Muunnettu hoikkuus

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{137,84}{\pi} \times \sqrt{\frac{25 \text{ N/mm}^2}{10\,800 \text{ N/mm}^2}} = 2,11$$

Alkukäyrydestä johtuva ky-kerroin $\beta_c = 0,1$ (liimapuu)

Nurjahduskerroin

$$k_z = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = 0,5 \times (1 + 0,1 \times (2,11 - 0,3) + 2,11^2) = 2,82$$

Ehto

$$k_{z,d} \leq 1$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{2,82 + \sqrt{2,82^2 - 2,11^2}} = 0,21$$

Ei kaupalliseen käyttöön

Nurjahduskestävyys Z-suuntaan

$$I_y = \frac{(h \times b^3)}{12} = \frac{(600 \text{ mm} \times (514 \text{ mm})^3)}{12} = 6,79 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{6,79 \times 10^9 \text{ mm}^4}{308\,040 \text{ mm}^2}} = 142,38 \text{ mm}$$

Pilarin hoikkuus

$$\lambda_y = \frac{L_c}{i_y} = \frac{9\,550 \text{ mm}}{142,38 \text{ mm}} = 64,36$$

Muunnettu hoikkuus

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{64,36}{\pi} \times \sqrt{\frac{25 \text{ N/mm}^2}{10\,800 \text{ N/mm}^2}} = 0,986$$

Alkukäyrydestä johtuva k_y -kerroin $\beta_c = 0,1$ (liimapuu)

$$k_y = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) \\ = 0,5 \times (1 + 0,1 \times (0,986 - 0,3) + 0,986^2) = 0,99$$

Ehto

$$k_{c,y} \leq 1$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{1,09 + \sqrt{0,99^2 - 0,986^2}} = 1$$

Yhdistetyt jännitykset taivutukselle ja puristukselle

Kerroin k_m suorakaidepoikkileikkauksiselle liimapuulle $k_m = 0,7$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = \frac{2,53 \text{ N/mm}^2}{0,21 \times 22,92 \text{ N/mm}^2} + \frac{3,52 \text{ N/mm}^2}{25 \text{ N/mm}^2} + 0,7 \times$$

$$\frac{0,56 \text{ N/mm}^2}{25 \text{ N/mm}^2} \leq 1,00$$

$$0,68 \leq 1,00$$

käyttöaste 68 %

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} = \frac{2,53 \text{ N/mm}^2}{1 \times 22,92 \text{ N/mm}^2} + 0,7 \times \frac{3,52 \text{ N/mm}^2}{25 \text{ N/mm}^2} + \frac{0,56 \text{ N/mm}^2}{25 \text{ N/mm}^2} \leq$$

$$1,00$$

$$0,23 \leq 1,00$$

käyttöaste 23 %

Kiepahdus

Tehollinen kiepahduspituus $L_{c,z} = L + 2 \times h = 10\,750 \text{ mm}$

Suorakaidepalkkinen taivutusjännitys $c = 0,71$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \times b^2}{h \times L_{ef}} \times E_{0,05} = \frac{0,71 \times (514 \text{ mm})^2}{600 \text{ mm} \times 10\,750 \text{ mm}} \times 10\,800 \text{ N/mm}^2 = 314,09 \text{ N/mm}^2$$

Suhteellinen hoikkuus

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{30 \text{ N/mm}^2}{314,09 \text{ N/mm}^2}} = 0,31$$

k_{crit} –kerroin on 1 suhteellisen hoikkuuden ($\lambda_{rel,m}$) ollessa $< 0,75$

Mitoitusehto

$$\sigma_{m,y,d} \leq k_{crit} \times f_{m,d} = 1 \times 27,5 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow 0,65 \text{ N/mm}^2 \leq 27,5 \text{ N/mm}^2$$

Käyttöaste 2,36 %

Kiepahduksen ja nurjahduksen yhteisvaikutus

$$\left(\frac{\sigma_{m,z,d}}{k_{crit} \times f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,o,d}}{k_{cz} \times f_{c,o,d}} \leq 1,00 \Rightarrow \left(\frac{3,52 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1 \times 25 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \right)^2 + \frac{2,53}{0,21 \times 22,92 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 0,545 \leq 1,00$$

Käyttöaste 54,5 %

Pilarin hiiltymämitoitus

Lasketaan 90 min palon mukaiset poikkileikkaukset

Nimellinen hiiltymissyvyyden mitoitusarvo

$$d_{char,n} = \beta_n \times t = 0,7 \text{ mm/min} \times 90 \text{ min} = 63 \text{ mm}$$

Tehollinen hiiltymissyvyys

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \times d_t = 63 \text{ mm} + 1 \times 7 \text{ mm} = 70 \text{ mm}$$

Pilarin kyljistä ja sisäpinnasta hiiltyy 70 mm 90 min palon aikana, jolloin onnettomuustilanteessa ehdot täyttävät pilarin sivujen mitat ovat $b=444 \text{ mm}$ ja $h=460 \text{ mm}$ ja jäännöspoikkileikkaus on $204\,240 \text{ mm}^2$.

Palotilanteen kuorma pilarille

Muuttuvien kuormien yhdistelmäkerroin $\Psi_n = 0,6$

$$p_{fi} = p_{g,k} + \Psi_n \times p_{q,k} = 358 \text{ kN} + 0,6 \times 11,4 \text{ kN} = 361,84 \text{ kN}$$

Puristetun tai samanaikaisesti taivutetun ja puristetun sauvan
avaruusnurjahdusmitoitus

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \times f_{c,0,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{1,77 \text{ N/mm}^2}{0,9 \times 22,92 \text{ N/mm}^2} + 0,7 \times \frac{3,52 \text{ N/mm}^2}{25 \text{ N/mm}^2} + \frac{0,26 \text{ N/mm}^2}{27,5 \text{ N/mm}^2} =$$

$$0,193 \leq 1,00$$

Käyttöaste 19 %

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{1,77 \text{ N/mm}^2}{0,1 \times 22,92 \text{ N/mm}^2} + \frac{3,52 \text{ N/mm}^2}{25 \text{ N/mm}^2} + k_m \times \frac{0,26 \text{ N/mm}^2}{27,5 \text{ N/mm}^2} =$$

$$0,92 \leq 1,00$$

Käyttöaste 92 %

Kiepahduksen ja nurjahduksen yhteisvaikutus

$$\left(\frac{\sigma_{m,z,d}}{k_{crit} \times f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,0,d}}{k_{c,z} \times f_{c,0,d}} \leq 1,00 \Rightarrow \left(\frac{3,52 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1 \times 25 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \right)^2 + \frac{1,77 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{0,1 \times 22,92 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \leq 0,79 \leq 1,00$$

Käyttöaste 79 %