



JESSE FORMA

Puupalkin reikien mitoittaminen

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIIKAN TUTKINTO-
OHJELMA
2022

Tekijä(t) Forma, Jesse	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä joulukuu 2022
	Sivumäärä 56 + 4	Julkaisun kieli suomi
Julkaisun nimi Puupalkin reikien mitoittaminen		
Tutkinto-ohjelma Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutusohjelma, Rakennesuunnittelu		
<p>Tilaajana tälle opinnäytetyölle toimi A-Insinöörit Suunnittelu Oy, jolle oli syntynyt tarve puupalkin reiän mitoituksen tutkimukselle. Puurakentamista pyritään lisäämään Suomessa, jonka vuoksi yritykselle haluttiin saada lisää tietoa tästä aiheesta.</p> <p>Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää puupalkin reikien mitoittamista eri materiaaleilla, sekä selvittää reiän vahvistamista erilaisin menetelmin. Tutkimusta lähdettiin toteuttamaan teoriapohjaisena kvalitatiivisena tapaustutkimuksena. Tutkimus perustettiin jo olemassa oleviin kirjallisuus lähteisiin. Tutkittava aihe rajautui vain reiän mitoittamiseen, eikä koko puupalkin mitoitukseen.</p> <p>Työssä käytiin läpi sahatavara, LVL, liimapuu sekä CLT-materiaalit. Aluksi käytiin läpi näiden materiaalien ominaisuuksia ja valmistusta, jonka jälkeen siirryttiin itse mitoittamiseen. Tutkimuksessa saatiin vastaus, kuinka liimapuu, LVL ja sahatavarapalkin reikämitoitus toteutetaan, mutta CLT-palkin osalta ongelma jäi ratkaisematta. Tämän jälkeen työssä tarkasteltiin reiän vahvistamistapoja, joita tarkempaan tarkasteluun valikoitiin ruuvi-, liimatanko- ja levyvahvistaminen. Näiltä osin tutkimusongelmaan saatiin ratkaisu. Lopuksi työssä käytiin tutkimustuloksia läpi sovelluslaskelman muodossa. Tämän laskelman tuloksia verrattiin Finnwood -mitoitushjelmalla toistettuun laskelmaan. Näiden vertailusta saatiin eroja poikittaisen vedon ja taivutuksen käyttöasteiden osalta. Ratkaisua siihen mistä tämä johtui, ei tutkimuksessa saatu selville. Lopuksi pohdittiin vielä tutkimuksen luotettavuutta.</p>		
Avainsanat Puupalkki, reikä, mitoittaminen, puurakenteet, liimapuu, LVL, CLT, sahatavara, Finnwood, vahvistaminen, ruuvi, liimatanko, vaneri		

Author(s) Forma, Jesse	Type of Publication Bachelor's thesis	Date December 2022
	Number of pages 56 + 4	Language of publication: Finnish
Title of publication Design of holes in a wooden beam		
Degree programme Construction and civil engineering, Structural design		
<p>The client for this thesis was A-Insinöörit Suunnittelu Oy, which had created a need for research on the planning of the wooden beam hole. The goal was to increase timber construction in Finland, which led to the company's desire to have more information on this topic.</p> <p>The goal of the study was to examine the planning of holes in the wooden beam with different materials, as well as to examine the reinforcement of the hole using different methods. The research was carried out as a theory-based qualitative case study. The study was established on already existing literature sources. The topic under study was limited to only planning the hole instead of planning the entire wooden beam.</p> <p>The work involved lumber, LVL, glulam, as well as CLT materials. Initially, we went through the properties and preparation of these materials, after which we moved on to planning itself. The study provided an answer as to how glulam, LVL and sawn timber beam hole planning is carried out. For the CLT beam the problem remained unsolved. The work then looked at ways of reinforcing the hole, which was selected for closer examination by screw, glued-in rod, and plate reinforcement. From these, a solution to the research problem was obtained. Finally, the work went through research results in the form of an application calculation. The results of this calculation were compared with the calculation repeated using the Finnwood engineering software. A comparison of these yielded differences in the rates of perpendicular tension and bending utilization. The investigation did not conclude why this was happening. Finally, there was further reflection on the reliability of the study.</p>		
Keywords timber beam, hole, planning, wooden structures, glulam, LVL, CLT, lumber, Finnwood, reinforcement, screw, glued-in rod, glued-on plywood		

ALKUSANAT

Kiitos A-Insinöörit Suunnittelu Oy, mielenkiintoisen opinnäytetyön mahdollistamisesta. Haluan kiittää myös ohjaajaani Henri Salosta hyvästä ohjaamisesta ja kannustamisesta. Kiitän myös opettajaani Topi Rissasta hyvästä opetuksesta, jonka vuoksi olen kiinnostunut erityisesti puurakentamisesta.

Porissa, 4.12.2022

Jesse Forma

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	6
2 TUTKIMUSMENETELMÄT.....	7
3 YLEISTÄ PUUMATERIAALEISTA	8
3.1 Sahatavara	9
3.2 LVL.....	11
3.3 Liimapuu	12
3.4 CLT	13
4 PUURAKENTEIDEN SUUNNITTELU YLEISESTI.....	15
5 PUUPALKIN REIKIEN SUUNNITTELU	17
5.1 Liimapuu- ja LVL-palkki.....	18
5.1.1 Poikittainen vetokestävyys	19
5.1.2 Leikkauskestävyys.....	23
5.1.3 Puristus- ja vetokestävyys.....	25
5.1.4 Taivutuskestävyys.....	27
5.1.5 Yhteisvaikutus	30
5.2 Sahatavarapalkki	30
5.3 Reikien vahvistaminen	32
5.3.1 Ruuvivahvistus	33
5.3.2 Liimatankovahvistus.....	36
5.3.3 Levyvahvistus	37
5.4 CLT-palkit.....	40
6 SOVELLUSLASKELMA	44
7 TUTKIMUSTULOSTEN ANALYSOINTI JA POHDINTA	51
8 YHTEENVETO	53
LÄHTEET	
LIITTEET	

1 JOHDANTO

Suomessa on tällä hetkellä voimassa Puurakentamisen toimenpideohjelma, jonka tavoitteina on lisätä puurakentamista sekä puurakenteiden suunnittelun ja rakentamisen osaamista ympäri Suomea. Tavoitteena on edistää myös kansainvälistä tutkimus- ja kehitystyötä. Tämä ohjelma on käynnistetty jo vuonna 2016 ja se jatkuu vielä vuoden 2023 loppuun asti. Ohjelmaa hallinnoivat yhdessä ympäristöministeriö sekä valtioneuvosto. Ohjelma on kehitetty yhteiskunnallisten sekä ilmastopoliittisten tarpeiden mukaan. Puun käyttöä lisäämällä voidaan pienentää rakentamisesta aiheutuvaa hiilijalanjälkeä. Puu sitoo hiilidioksidia itseensä, jolloin se toimii hiilivarastona. (Ympäristöministeriö, n.d.)

Työn toimeksiantaja toimii A-Insinöörit Suunnittelu Oy, jolla on tarve puupalkkien reikien mitoituksen tutkimiselle. Tällä hetkellä yrityksessä ei ole selkeää yhtenäistä mitoitustapaa, jolloin suunnittelu on työlästä sekä aikaa vievää. Tutkimuksen tavoitteena on lisätä tietämystä asiasta, joten työ tullaan esittämään yrityksen sisäisessä tietoisuudessa, jolla tietoa saadaan jaettua kaikille.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, kuinka eri materiaaleista tehtyihin puupalkkeihin voidaan tehdä reikiä. Tavoitteena on myös selvittää, kuinka reikä vahvistetaan tarvittaessa ja miten ne mitoitetaan. Tarkastelussa käsitellään ainoastaan yksiaukkoista puupalkkia. Tutkimuksessa tullaan käsittelemään myös puun käyttäytymistä ympäröivissä olosuhteissa sekä kuormitusten pitkäaikaisuuden vaikutusta rakenteeseen. Työssä selvitetään myös, kuinka nämä huomioidaan yleisesti puurakenteiden mitoitamisessa. Työssä ei käydä läpi muuten yleisesti puurakenteiden mitoitamista muilta osin, kuin puupalkin reiän mitoitamiseen vaikuttavat asiat. Kuormien muodostuminen on rajattu työstä pois. Näiltä osin annetaan vain suoraan valmiit suunnittelu-arvot, jotka vaikuttavat reiän kohdalla.

Tutkimuksen aihe on tällä hetkellä ajankohtainen, koska puurakentamista ja sen suunnittelun osaamista pyritään lisäämään laajalti Suomessa. Tilaaja yrityksellä on myös tarve tällaiselle tutkimukselle, jonka avulla tietämystä saadaan lisättyä aiheesta.

2 TUTKIMUSMENETELMÄT

Määrällisessä eli kvantitatiivisessa tutkimuksessa pyritään etsimään tietoa suuresta otoksesta, jolloin saadaan luotettava kuva tutkimustuloksesta niiden toistuvuuden kautta. Tällöin saadaan pienennettyä sattuman vaikutusta tuloksiin. Laadullisessa eli kvalitatiivisessa tutkimuksessa yritetään selvittää mahdollisimman paljon kyseisestä aiheesta. Tutkimus voidaan toteuttaa erilaisin menetelmin, kuten tutkimalla kirjallisuutta tai haastattelemalla. Kun tutkimusta tehdään teoriapohjaisesti, tutkitaan tällöin jo olemassa olevaa teoriaa, eikä tuoteta mitään uutta, toisin kuin aineistolähtöisessä. Aineistolähtöisessä tutkimustavassa voidaan kerätä esimerkiksi haastatteluja, joiden pohjalta lopulta lopullinen tutkimus tehdään. (Opinkirjo kehittämiskeskus, n.d.) Tapaustutkimukselle on ominaista, että tutkittavana asiana on jokin esimerkki tapaus, jostakin isommasta aiheesta (Vuori, n.d.). Tämän työn tutkimusmenetelmä on teoriapohjainen kvalitatiivinen tapaustutkimus, koska tutkimuksessa käsitellään tiettyä tapausta suuremmasta kokonaisuudesta. Tässä tutkimuksessa on keskitytty erityisesti juuri puupalkissa esiintyvän reiän mitoittamiseen, eikä koko puupalkin mitoittamiseen, joka olisi tässä tapauksessa se suurempi kokonaisuus. Tutkimusta lähdetään tekemään tutkimalla teoriapohjaa reiän mitoittukseen liittyen jo olemassa olevista kirjallisuuslähteistä, jonka vuoksi menetelmäksi valikoituu juuri teoriapohjainen kvalitatiivinen tutkimus.

Työssä esitellään aluksi lähteet ja mihin nämä mitoitusperusteet perustuvat, jonka jälkeen tutkimusta lähdetään tekemään tutkimalla puun ominaisuuksia rakennusmateriaalina ja eri puumateriaalien eroja niiden valmistustapojen ja ominaisuuksien osalta. Tämän jälkeen selvitetään yleisesti puurakenteiden mitoituksessa huomioitavia asioita, jotka liittyvät tähän aiheeseen. Seuraavaksi siirrytään tarkemmin juuri palkissa olevan reiän mitoittamiseen, perehtymällä kuinka se mitoitetään erilaisissa

puumateriaaleissa. Tutkitaan myös reiän vahvistamista erilaisin menetelmin tässä kohdassa. Tämän teoriapohjan osalta sovelletaan mitoitusesimerkki yhden materiaalin osalta. Tätä esimerkkiä verrataan Finnwood -mitoitushjelmalla tehtävään laskelmaan. Lopuksi analysoidaan tuloksia ja niiden luotettavuutta sekä pohditaan tehtyä tutkimusta.

Puun ominaisuuksista ja eri puumateriaalien valmistuksesta kerrotaan materiaalikohtaisien käsikertojen ja julkaisujen avulla. Suomessa puurakenteita mitoitetaan SFS-EN 1995-1-1 Eurokoodi 5 mukaan. Tämän työn lähteinä mitoittamisessa on käytetty Suomen Rakennusinsinöörien Liiton julkaisemaa RIL 205-1-2017 sekä Eurokoodi 5 Puurakenteiden lyhennettyä suunnitteluohjetta, jotka perustuvat edellä mainittuun eurokoodiin (Puuinfo, 2020, s. 8; RIL 205-1-2017, 2017, s. 10). Lisäksi RIL 205-1-2017 soveltaa Rakentamismääräyskokoelman ohjeita reikien mitoitusten osalta (RIL 205-1-2017, 2017, s. 10). Edellä mainituista lähteistä ei löydy suoraan lujuusopin peruskäyttöjä, joten työssä käytetään myös Puuinfon vaativien puurakenteiden suunnittelukokemuksen materiaalia. Sovelluslaskelman tuloksen vertailussa käytetään Finnwood -mitoitushjelmaa, jolle on tehty kolmannen osapuolen tarkastus VTT:n toimesta (Metsä Wood, 2021).

CLT-palkin mitoitusta poikkeaa muista palkeista, siksi näitä edellä mainittuja lähteitä ei voida käyttää niihin. Eurokoodit eivät vielä toistaiseksi käsittele CLT:n mitoitusta, joten työssä sovelletaan tämän osalta aiheeseen liittyvää tutkimusta. (Flaig, M., 2014, kohta 1.)

3 YLEISTÄ PUUMATERIAALEISTA

Suomessa rakentamisessa yleisimmin käytetyt puulajit ovat mänty ja kuusi. Niiden ominaisuudet ovat lähes samanlaisia, jonka vuoksi niille on annettu rakentamisessa samanlaiset lujuusominaisuudet. Puun ominaisuuksissa voi olla suuriakin vaihteluita, vaikka kyseessä olisikin sama puulaatu. Tämä johtuu siitä, että puu kasvaa luonnossa, eikä esimerkiksi sen suoruteen ja siihen muodostuvien oksien sijainteihin voida

vaikuttaa. Puun etuna muihin rakennusmateriaaleihin verrattuna on sen hyvät lujuusominaisuudet sekä kevyt paino niihin nähden. Lämmöneristävyys ominaisuudet ovat puulla huomattavasti paremmat kuin muilla rakennusmateriaaleilla, jonka vuoksi puu tuntuu mukavammalta niin kuumalla kuin kylmälläkin. Puun työstäminen on helppoa yksinkertaisillakin työvälineillä. (Puuinfo, 2019a, s. 6.)

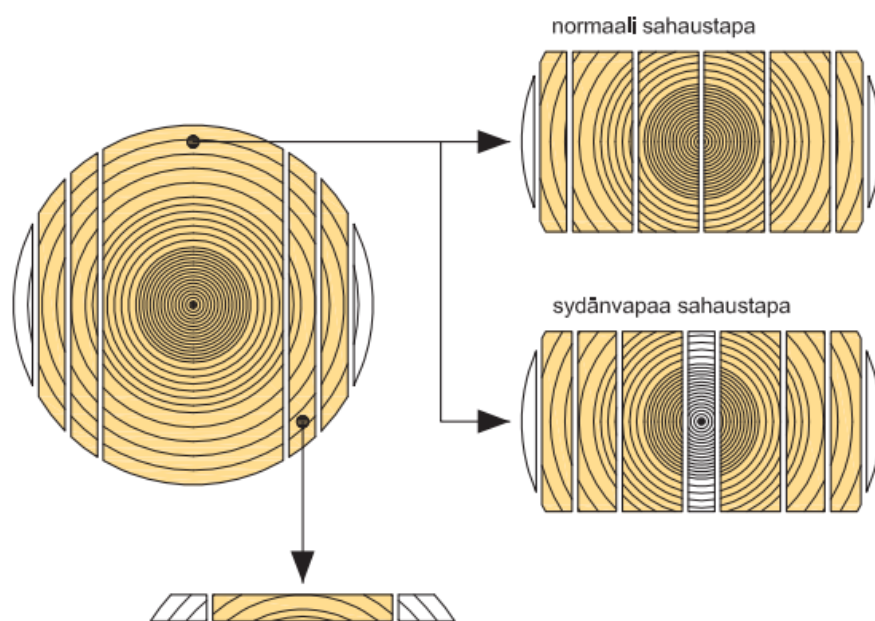
Puun tiheys vaikuttaa sen lujuusominaisuuksiin. Tiheämpi puu on lujempaa ja täten parempaa rakentamisessa. Suomessa kasvaneen kuusen tiheys on noin 300–470 kg/m³ ja männyn 370–550 kg/m³. (Puuinfo, 2019a, s. 6, 7.) Puulla on erilaiset lujuusominaisuudet riippuen mistä suunnasta puuta kuormitetaan. Syysuuntaisesti puu pystyy ottamaan suurempia kuormituksia vastaan, kuin kohtisuoraan syitä nähden tulevia kuormituksia. Tämä tarkoittaa, että puu on ortotrooppinen materiaali. (Puuinfo, 2019a, s. 7; Suomen Liimapuuyhdistys & Puuinfo, 2015a, kohta 2.3.)

Puun kosteuspitoisuus muuttuu sen ympärillä olevan ilman suhteellisen kosteuden mukaan. Tämä tarkoittaa sitä, että puu on hygroskooppinen materiaali. Se pystyy siis sitomaan kosteutta ympäröivästä ilmasta ja luovuttamaan sitä takaisin ilmaan, mikäli ympäristön kosteuspitoisuus muuttuu. Puun kosteuspitoisuus ja sen vaihtelut vaikuttavat puun lujuuteen ja jäykkyyteen. Puun lujuusominaisuudet heikkenevät puun kostuessa liikaa. Kosteus vaikuttaa myös poikkileikkaukseen, sillä kostuessaan puu turpoaa ja laajenee, kun puolestaan kuivuessaan kutistuu ja pienenee. Nämä muodon muutokset aiheuttavat puun sisälle erilaisia sisäisiä jännityksiä, joiden seurauksena puu voi halkeilla ja muuttaa muotoaan. Muodonmuutokset ovat suurempia poikittaissuunnassa, kuin pitkittäissuunnassa. Tähän vaikuttavat puun syysuunnat, jonka seurauksena puulla on erilaiset ominaisuudet eri suuntiin. Puun kosteuspitoisuuden olisi hyvä olla yleisesti 8–25 % välillä. (Puuinfo, 2019a, s. 8, 9; Suomen Liimapuuyhdistys & Puuinfo, 2015a, kohta 2.3.)

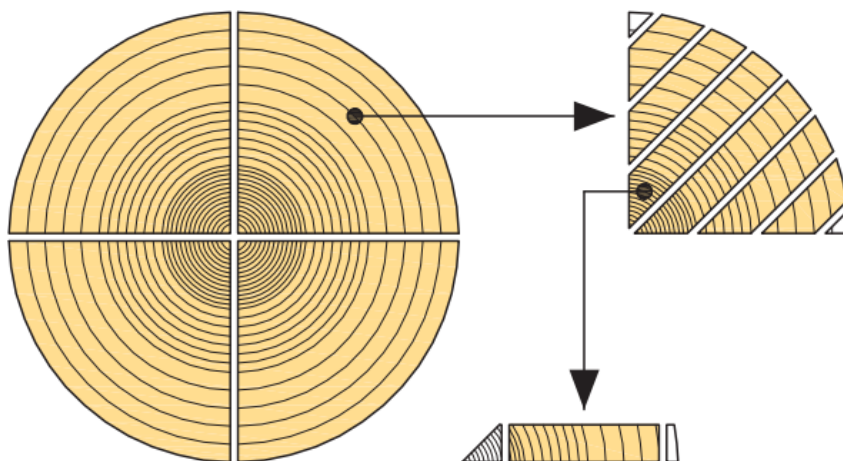
3.1 Sahatavara

Sahatavara tarkoittaa yleisnimitystä puutavaralle, joka on sahattu jokaiselta puolelta (Puuinfo, 2019a, s. 12). Sahatavaran valmistus alkaa tukin vastaanotosta, jonka yhteydessä tukit mitataan ja lajitellaan. Lajitellut tukit varastoidaan odottamaan tuotantoon

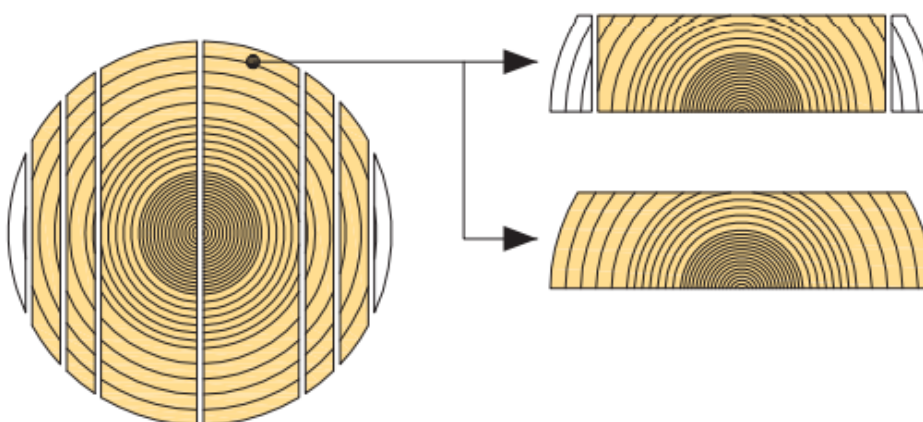
ottamista. (Varis, 2017, s. 64.) Kun tukit otetaan tuotantoon, tuotannon alkupäässä tukit kuoritaan puhtaaksi. Kuorimisen jälkeen tukit menevät sahaukseen. (Varis, 2017, s. 73, 83.) Sahaus tehdään yleensä kuvan 1 tavalla, mutta voidaan käyttää myös muita sahaustapoja (Puuinfo, 2019a, s. 14). Sahaamisen jälkeen puutavara tuorelajitellaan ja kuivataan. Kuivauksen jälkeen puutavara lajitellaan laadun mukaan ja katkaistaan haluttuun mittaan. Lopuksi puuniput paketoidaan ja varastoidaan odottamaan toimitusta asiakkaalle. (Varis, 2017, s. 83, 151.) Tuorelajittelussa lajittelu tapahtuu konenäköä hyväksi käyttäen. Lajittelu perusteena on pääasiassa puutavaran mitat, mutta myös laatu voidaan huomioida tässä vaiheessa. Laatuun vaikuttaa virheet kuten vajaasärmäisyys ja oksat. (Varis, 2017, s. 172–173.) Kuivan sahatavaran lajitellaan laadun ja lujuuden mukaan. Lujuuslajittelu voidaan tehdä, joko visuaalisesti tai koneellisesti. C14...C30 lujuusluokat voidaan todeta visuaalisesti tai koneellisesti, kun taas C35...C50 lujuusluokat voidaan todeta vain koneellisesti. (Puuinfo, 2019a, s. 20.) Pohjoismaissa on käytössä kahdenlaista sahaustapaa: normaali ja sydänvapaa sahaustapa (kuva 1). Muita sahaus tapoja on kvarttisahaus (kuva 2) ja läpisahaus (kuva 3). Kvanttisahaus menetelmä on hyvä, jos halutaan puulle erittäin hyvä muotopysyvyys ja tietynlainen syykuviointi. Tämän menetelmän huonona puolena on suuri materiaalihukka. Läpisahaus menetelmä on silloin hyvä, kun tukit ovat liian pieniä normaaliin sahaus tapaan. (Puuinfo, 2019a, s. 14.)



Kuva 1. Yleinen sahauskäytäntö Pohjoismaissa (Puuinfo, 2019a, s. 14).



Kuva 2. Kvarttisahaus (Puuinfo, 2019a, s. 14).



Kuva 3. Läpisahaus (Puuinfo, 2019a, s. 14).

3.2 LVL

LVL (laminated veneer lumber) eli viilupuu valmistetaan liimaamalla ohuita viiluja yhteen. Viilupuu valmistus alkaa tukin kuorimisella ja katkaisemisella haluttuun mittaan. Katkaisun jälkeen tukista leikataan tyypillisesti 3 mm paksuja viiluja sorvissa, jonka jälkeen viilut leikataan sopiviin paloihin niin, että niistä poistetaan virhekohdat. Valmiit viilut menevät kuivatukseen ja lujuuslajitteluun. Seuraavaksi viiluille levitetään liima ja ladotaan haluttu määrä päällekkäin tyypillisesti pariton määrä. Liimana käytetään pääasiassa fenoliformaldehydiliimaa. Liimauksen jälkeen viilut puristetaan kuumapuristimella ja annetaan liiman kuivua. Lopuksi valmiit LVL-paneelit sahataan haluttuihin mittoihin ja tehdään tarvittavat lopputyöstöt kuten reiät ja lovet. (Puuteollisuus, 2020, s. 26–32.) Kuumapuristin liimauksella voidaan valmistaa suurimmillaan 75 mm paksuja tuotteita, mutta suurempia paksuuksia 500 mm asti saadaan liimaamalla LVL-paneeleita yhteen. Tämä tehdään liimalla, joka ei tarvitse kuumapuristusta

ja on hyväksytty kantavien rakenteiden liimauksessa. Yhdistelemällä viilupuuta voidaan muodostaa erimuotoisia LVL-tuotteita kuten I-palkkeja, laatikkopalkkeja sekä ristikkorakenteita. Suurin mahdollinen LVL-palkin korkeus on 2500 mm ja pituus 25 metriä. (Puuteollisuus, 2020, s. 37–39.)

Viilupuulla on erinomaiset lujuusominaisuudet, johtuen lamellivaikutuksesta. Tällöin viiluissa olevat virheet jakautuvat tasaisesti koko tuotteelle. Tästä syystä viilupuuta on erittäin tasalaatuista materiaalia. Viilupuuta on kahdenlaista LVL-P ja LVL-C. LVL-P:llä on parhaat lujuus- ja jäykkyysominaisuudet yhteen suuntaan, koska kaikkien viilujen syyt ovat liimattu samaan suuntaan. Kun taas LVL-C:ssä noin 20 prosenttia viiluista on liimattu poikittain, tällöin se heikentää ominaisuuksia pintaviilujen suuntaan, mutta poikittaissuuntaan ominaisuudet paranevat. (Puuteollisuus, 2020, s. 44.) LVL-P on ihanteellinen pilari- ja palkkirakenteissa ja LVL-C on ristiliimauksen ansiosta ihanteellinen kantavana suurikokoisena paneelina esimerkiksi katto-, seinä- ja lattiaelementeissä (Puuteollisuus, 2020, s. 10–11). Viilupuun lujuusluokat ovat LVL 48 P, LVL 32 P, LVL 36 C ja LVL 25 C (Puuteollisuus, 2020, s. 45).

3.3 Liimapuu

Liimapuutuotteet valmistetaan liimaamalla puulamelleja yhteen ja tätä kautta saadaan suurempia profiileja. Valmistus alkaa lamellien valmistamisesta, sahaamalla puutavara halutun kokoisiksi lamelleiksi. Tämän jälkeen yksittäiset lamellit kuivataan, lujuuslajitellaan ja sormijatketaan. Jatkamisen jälkeen lamellit höylätään ja pinnoille levitetään liimaa, jonka jälkeen lamellit liimataan yhteen. Liiman kovettumisen jälkeen liimapuu vielä höylätään ja tehdään muut tarvittavat työt tuotteelle, kuten reunojen sahaaminen ja reikien tekeminen. Liimapuusta voidaan valmistaa eri muotoisia tuotteita käyttökohteesta riippuen, kuten suorja, kaarevia sekä rakenneosia, joissa poikkileikkaus muuttuu. Harjapalkki on hyvä esimerkki tällaisesta rakennusosasta, jossa poikkileikkaus muuttuu. (Suomen Liimapuuyhdistys & Puuinfo, 2015a, kohta 1.3.) Edellä mainittujen lisäksi voidaan valmistaa myös eri muotoisia poikkileikkauksia kuten I-, T- ja L-profiileja, sekä yhdistelemällä liimapuuta saadaan tehtyä suorakaiteen muotoisia ontelopoikkileikkauksia. Liimapuun poikkileikkauksen suurin leveys on 265 mm, korkeus 2 m ja suurin pituus 30 m. Erikoistilauksella voidaan valmistaa jopa

500 mm leveitä ja 40 m pitkiä tuotteita. (Suomen Liimapuu yhdistys & Puuinfo, 2014, s. 21.)

Liimapuun etuihin kuuluu sen hyvät lujuus- ja jäykkyysominaisuudet, kun verrataan sitä samankokoiseen sahatavaraan. Tämä johtuu lamellivaikutuksesta, samoin kuin viilupuulla. (Suomen Liimapuu yhdistys & Puuinfo, 2015a, kohta 1.3.) Liimapuun valmistuksessa käytettäviä liimoja on kahta eri tyyppiä: liimatyyppi I ja II. Tyyppiä I voidaan käyttää kaikissa eurokoodi 5:n käyttöluokissa 1–3. Tyyppiä II voidaan käyttää vain käyttöluokissa 1–2. (Suomen Liimapuu yhdistys & Puuinfo, 2014, s. 19.) Liimapuuta on kahdenlaista, yhdistettyä ja homogeenistä liimapuuta. Yhdistetty liimapuu on valmistettu käyttämällä lujempaa puutavaraa ulkolamelleissa ja sisälamelleissa lujuudeltaan heikompaa puutavaraa. Tämä siitä syystä, että palkin ylä- ja alareunassa on suuremmat jännitykset. Ulkolamellit ovat vähintään kuudesosan poikkileikkauksen korkeudesta ja loput ovat sisälamelleja. Kuvassa 4 on esitetty yhdistetyn liimapuun GL30c lamellien asettelu. Homogeenisessä liimapuussa kaikki lamellit ovat samaa lujuusluokkaa. (Suomen Liimapuu yhdistys & Puuinfo, 2014, s. 22.) Liimapuun lujuusluokat ovat GL 20, GL 22, GL 24, GL 26, GL 28, GL 30 ja GL 32 (SFS EN 14080:2013, 2013, s. 24).

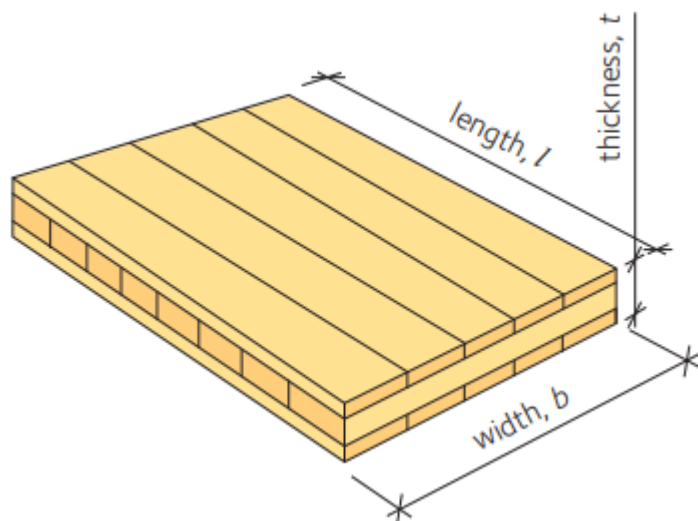


Kuva 4. Esimerkki liimapuusta GL30c, jossa esitetty lamellien asettelu (Suomen Liimapuu yhdistys & Puuinfo, 2014, s. 23).

3.4 CLT

CLT (cross laminated timber) eli monikerroslevy, joka on valmistettu ristiin liima-
tuista lamelleista (Puuinfo, 2019a, s. 45). Lamellien valmistus aloitetaan sahaamalla
puusta halutun kokoisia lamelleja, jonka jälkeen ne kuivataan. Tämän jälkeen lamellit

lujuuslajitellaan, sormijatketaan ja jatkettut lamellit höylätään liiman kovettumisen jälkeän. Liimaus voidaan tehdä kahdella eri tavalla. Toinen tapa on liimata lamellit syrjistä levyiksi ja levyt liimataan päällekkäin toisiinsa, joka toinen kerros ristiin kuten kuvassa 5 on esitetty. Tai toinen tapa on jättää syrjän liimaus tekemättä ja liimata vain kerrokset toisiinsa. Liimauksessa käytetään puristusta, joka puristaa monikerroslevyä joka puolelta. Puristustapoja on kahdenlaista, joko tyhjiö- tai hydraulista puristusta. Liiman kovettuttua CLT-levy leikataan halutun kokoiseksi ja lisätään lovet, reiät ja muut varaukset. (Borgström & Fröbel, 2019, s. 16–17; Puuinfo, 2019a, s. 45.) CLT:stä voidaan valmistaa suorien rakenteiden lisäksi myös kaarevia osia, joilla saadaan rakennettua myös arkkitehtuurisia rakenteita (Borgström & Fröbel, 2019, s. 8). CLT koostuu vähintään kolmesta kerroksesta ja sen poikkileikkauksessa on yleensä pariton määrä kerroksia (Borgström & Fröbel, 2019, s. 37). CLT:n suurimmat saatavilla olevat mitat ovat: paksuus 500 mm, leveys 4.8 m ja pituus 30 m (Borgström & Fröbel, 2019, s. 16).



Kuva 5. Kolmikerroksinen CLT-levy (Borgström & Fröbel, 2019, s. 16).

CLT:llä on myös erinomainen kestävyys suhteessa sen omaan painoon. Se on myös hyvin tasalaatuista, koska kohtisuorassa olevat kerrokset tasoittavat puissa ilmenneitä virheitä, samoin kuin viilupuun ja liimapuun lamellivaikutus. (Borgström & Fröbel, 2019, s. 8, 19.) CLT:n ominaisuudet riippuvat myös liimaustavasta. Syrjäliimatut ovat täysin ilmatiiviitä, mutta kuivuessaan laudat voivat halkeilla. Syrjäliimaamattomat eivät ole täysin ilmatiiviitä, mutta kosteuseläminen tapahtuu saumoissa, jolloin vältetään lautojen halkeilu. (Puuinfo, 2019a, s. 45.) CLT pystyy rakenteensa vuoksi ottamaan kuormituksia vastaan myös kohtisuoraan pintalamelleja vastaan, johtuen sen

ristikkäisistä kerroksista. CLT suunnitellaan siten, että pintalamellit ovat kuorman pääkantosuunnassa, koska siinä suunnassa kuormitus on suurinta ja silloin rakenteesta saadaan suurin hyöty. Tästä syystä CLT:n pinnoissa ja pääkantosuunnassa olevissa lamelleissa yleensä käytetään saman lujuusluokan puuta. CLT:n standardi on uusi, eikä sitä ole yhdenmukaistettu. Siksi valmistavat yritykset ovat hankkineet tuotteilleen eurooppalaisen tekniseen arvioinnin eli ETA:n, ja tätä kautta ovat saaneet CE-merkin­nän tuotteilleen. (Borgström & Fröbel, 2019, s. 16–19.) Tästä syystä CLT:n tekniset ominaisuudet ja suunnittelu ohjeet ovat riippuvaisia valmistajasta (Puuinfo, 2019a, s. 45).

4 PUURAKENTEIDEN SUUNNITTELU YLEISESTI

Puurakenteen lujuuteen vaikuttavat, kuinka pitkäaikaisesti rakennetta kuormitetaan sekä millaisissa kosteusolosuhteissa rakenne sijaitsee. Mitä pidempään rakennetta kuormitetaan, sitä huonommin puurakenne sen kestää. Kuormien vaikutusaika otetaan mitoituksissa huomioon aikaluokkien avulla. Eurokoodi 5 käsittelee viisi erilaista aikaluokkaa, jotka ovat pysyvä, pitkäaikainen, keskipitkä, lyhytaikainen sekä hetkellinen. Pysyvällä tarkoitetaan yli 10 vuotta kestäviä kuormituksia, joita ovat muun muassa rakenteen oma paino ja maanpaine. Pitkäaikainen kuormitus kestää kuudesta kuukaudesta kymmeneen vuoteen esimerkiksi varastohalleissa olevista tavaroista syntyvät kuormat. Keskipitkät kuormitukset kuormittavat rakennetta yhdestä viikosta kuuteen kuukauteen. Tällaisia kuormituksia ovat esimerkiksi lumi sekä asuinkerrostalojen välipohjien hyötykuormat. Lyhytaikaisessa aikaluokassa kuormitukset kestävät alle viikon, joita ovat muun muassa portaiden hyötykuormat sekä väliseinien ja kaiteiden vaakakuormat. Hetkelliseen aikaluokkaan kuuluvat tuulesta aiheutuvat kuormitukset sekä onnettomuuskuormat. Aikaluokka määräytyy rakenteen lyhytaikaisimman kuormituksen mukaan. (Suomen Liimapuuyhdistys & Puuinfo, 2015a, kohta 2.3.) Taulukosta 1 nähdään vielä kuormien aikaluokat niiden kestojen mukaan.

Taulukko 1. Kuormien aikaluokat esitetty taulukossa niiden keston mukaan (SFS-EN 1995-1-1, 2014, s. 23).

Kuormien aikaluokka	Kuorman vaikutusajat
Pysyvä	yli 10 vuotta
Pitkäaikainen	6 kuukautta – 10 vuotta
Keskipitkä	1 viikko – 6 kuukautta
Lyhytaikainen	alle 1 viikko
Hetkellinen	

Puun kosteuskäyttäytyminen heikentää puun ominaisuuksia, kuten lujuutta, jolloin sen vaikutukset pitää ottaa huomioon mitoituksia tehdessä. Eurokoodi 5 jakaa rakenteet kolmeen eri käyttöluokkaan niiden kosteusolosuhteiden mukaan. Käyttöluokassa 1 puurakenteen kosteuspitoisuus ei nouse yleisesti yli 12 %. Näissä olosuhteissa ilman kosteus ei nouse yli 65 % kuin enimmillään muutamana viikkona vuoden aikana. Ilman lämpötila pysyttelee noin 20 °C. Tällaisia tiloja ovat esimerkiksi lämmitetyt sisätilat sekä lämpöeristeiden seassa olevat puurakenteet, kuten yläpohjan kantava palkki. Käyttöluokassa 2 rakenteiden kosteuspitoisuus ei nouse yli 20 %:iin. Näihin olosuhteisiin päästään esimerkiksi, kun rakennetta ympäröivä lämpötila on noin 20 °C, eikä sen kosteuspitoisuus nouse yli 85 %:iin, kuin enimmillään muutamana viikkona vuodessa. Ulkotiloissa olevat rakenteet voivat kuulua tähän käyttöluokkaan, mikäli ne pysyvät kuivina. Tilan tulee olla hyvin tuulettuva sekä vedeltä suojattuna joka suunnalta. Esimerkki rakenteita voisivat olla kylmän ullakon rakenteet sekä kesämökkien sisätilat, joita ei talvisin lämmitetä. Käyttöluokassa 3 rakenteen kosteuspitoisuus on yli 20 %. Tähän käyttöluokkaan luetaan rakenteet, jotka ovat kosteudelle alttiita, eivätkä luokadu edellä mainittuihin käyttöluokkiin. (Suomen Liimapuuyhdistys & Puuinfo, 2015a, kohta 2.3.)

Materiaalin suunnittelulujuutta laskettaessa rakenteen käyttöluokka sekä kuormitusten aikaluokka otetaan huomioon k_{mod} muunnoskerroimella (Puuinfo, 2020, s. 16). Yleisesti materiaalin lujuutta pienennetään k_{mod} kertoimella, mutta on myös tapauksia, joissa se toimii korottavana tekijänä, kuten taulukosta 2 on nähtävissä (SFS-EN 1995-1-1, 2014, s. 28).

Taulukko 2. Taulukossa on esitetty k_{mod} kertoimen määräytyminen sahatavaralla, liimapuulla, LVL sekä vanerilla (SFS-EN 1995-1-1, 2014, s. 28).

Käyttöluokka	Aikaluokka				
	Pysyvä	Pitkäaikainen	Keskipitkä	Lyhytaikainen	Hetkellinen
1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

Materiaalin suunnittelulujuuden laskemiseen käytetään apuna materiaalin osavarmuuskerrointa γ_M , joka määräytyy materiaalin mukaan. Osavarmuuskerroin huomioi puumateriaalissa olevat epävarmuudet. (Suomen Liimapuuyhdistys & Puuinfo, 2015a, kohta 2.2.) Tällaisia epävarmuuksia ovat esimerkiksi sahatavarassa oksa kohdat. Osavarmuuskertoimen arvo määräytyy puumateriaalin tasalaatuisuuden mukaan. Tästä syystä esimerkiksi liimapuun osavarmuusluku on pienempi kuin sahatavaran. (Suomen Liimapuuyhdistys & Puuinfo, 2015a, kohta 2.3.) Materiaalin osavarmuuskertoimet nähdään taulukosta 3. Mitoittamisessa käytetään

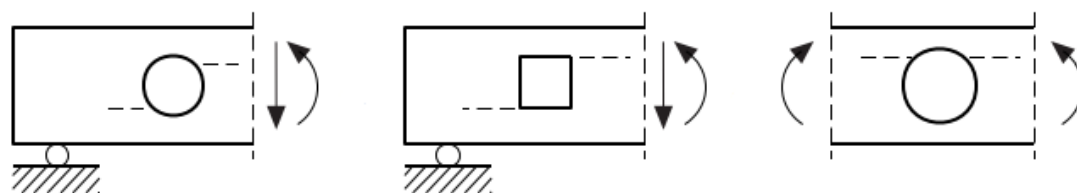
Taulukko 3. Materiaalien osavarmuuskertoimet sahatavaralle, liimapuulle, LVL, vanerille sekä liitoksille (SFS-EN 1995-1-1, 2014, s. 25).

Sahatavara	1,3
Liimapuu	1,25
LVL, vaneri	1,2
Liitokset	1,3

5 PUUPALKIN REIKIEN SUUNNITTELU

Reiät voivat merkittävästi vähentää palkin kantavuutta, siksi niiden tekemistä tulisi välttää. Reiän lähelle kohdistuu suuria poikittaisia vetojännityksiä, jotka voivat aiheuttaa syynsuuntaista halkeilua kuvan 6 mukaan. Murtumistapa on hauras, joka tapahtuu yhtäkkiä ilman suurempia muodonmuutoksia. Toisinaan palkkeihin on kuitenkin välttämätöntä tehdä reikiä esimerkiksi talotekniikan vaatimien putkien vuoksi, mikäli niitä ei saada sijoitettua rakenteisiin muuten. (Blaß & Sandhaas, 2017, s. 219.) Tällaisissa tapauksissa reikä tulisi sijoittaa mielellään palkin neutraaliakselille, mikäli reikä

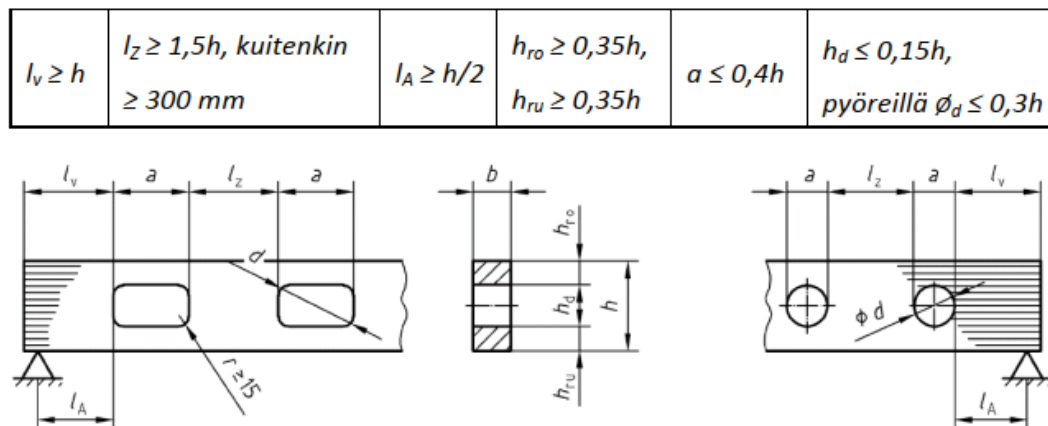
tehdään palkissa esiintyvän suurimman taivutusmomentin kohdalle. Reikien tekemisessä kannattaa suosia pyöreitä reikiä suorakaiteen muotoisten reikiä tilalle. Jos palkissa olevasta läpiviennistä viedään esimerkiksi kuuma putki, pitää kyseinen putki eristää reiän kohdalta, jotta sen ympärillä oleva puu ei kosteuskäyttäytymisen seurauksena halkeile. Mikäli palkki on alttiina suurille kosteusvaihteluille esimerkiksi ulkoti-loissa, niihin ei tulisi tehdä reikiä lainkaan. (Suomen Liimapuuyhdistys & Puuinfo, 2015a, kohta 5.3.)



Kuva 6. Palkissa esiintyvien reikiä ympärille aiheutuvia mahdollisia halkeamia kuvattu katoviivojen avulla (Blaß & Sandhaas, 2017, s. 219).

5.1 Liimapuu- ja LVL-palkki

Liimapuu ja LVL-palkeilla reikiä mitoittaminen aloitetaan, käymällä läpi mitoittamiseen liittyvät ehdot. Mikäli nämä ehdot täyttyvät, voidaan poikittaisen vedon mitoitus tehdä Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan. Reikiä halkaisija d ollessa 50 mm tai enemmän pitää kuvassa 7 olevat ehdot täyttyä. Lisäksi Suomessa suorakaiteenmuotoisten reikiä kulmien pyöristyssäteet r pitää olla vähintään 15 mm. Metsä Woodin Kerto LVL-palkki voitaisi vaihtoehtoisesti mitoittaa myös VTT:n sertifikaatin nro 184/03 mitoittavalla, mutta tässä työssä ei tätä käsitellä. Mikäli reiän halkaisija on alle 50 mm voidaan myös poikittainen vetokestävyys tarkastella alla esitetyllä tavalla, mutta tällöin ehtoja ei tarvitse tarkastella. Poikittaisen vedon lisäksi pitää tarkistaa reiän kohdalta leikkauskestävyys, puristus- ja vetokestävyys sekä taivutuskestävyys. Mikäli palkki saadaan kestäväksi reiän kohdalta edellä mainituilla tarkasteluilla, pitää lopuksi tarkistaa yhdistettyjen jännitysten ehdot. (RIL 205-1-2017, 2017, s. 94–95.) Reikiä saa tehdä vahvistamattomina vain käyttöluokissa 1 ja 2. Käyttöluokassa 3 reiät pitää aina vahvistaa (Blaß & Sandhaas, 2017, s. 227).



Kuva 7. Poikittaisen vedon tarkistamisen mitoitus ehdot (Ympäristöministeriö, 2016, s. 16).

Mikäli reikä on pyöreä ja enintään halkaisijaltaan $d = 30 \text{ mm}$ ja sijaitsee palkissa niin, että reiän keskipisteen etäisyys palkin ylä- ja alareunasta pitää olla vähintään $3d$ ja vähintään $5d$ palkin päästä. Mikäli reikiä on useampi, pitää myös reikien syysuuntainen keskiöetäisyys olla vähintään $5d$ sekä kohtisuorassa syitä vasten vähintään $3d$. Tällöin reiästä ei tarvitse tarkastella poikittaista vetoa. Muut tarkastelut pitää kuitenkin käydä läpi. (RIL 205-1-2017, 2017, s. 95.)

5.1.1 Poikittainen vetokestävyys

Poikittaisen vetolujuuden mitoitusarvo lasketaan kaavan 1 mukaan. Tähän käytetään materiaalin poikittaisen vedon ominaisarvoa, joka valitaan materiaalin mukaan. Ominaisarvot on esitetty kuvissa 8 ja 9 materiaalin mukaan. Mitoitusarvoa selvitetessä valitaan muunnoskerroin taulukosta 2 vallitsevan aikaluokan ja käyttöluokan mukaan. Osavarmuuskerroin valitaan materiaalin mukaan taulukosta 3. (Puuinfo, 2020, s. 15.)

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

Kuva 8. Liimapuun ominaislujuudet, jäykkyysominaisuudet sekä tiheydet (RIL 205-1-2017, 2017, s. 53).

Typical use		LVL 48 P	LVL 32 P	LVL 36 C	LVL 25 C
		Beam	Stud	Panel	Panel
Characteristic strength values, N/mm²					
Bending strength edgewise, $h = 300$ mm	$f_{m,0,edge,k}$	44	27	32	20
Bending strength flatwise	$f_{m,0,flat,k}$	48	32	36	25
Bending strength flatwise perpendicular to grain	$f_{m,90,flat,k}$	-	-	8	-
Compression parallel to grain	$f_{c,0,k}$	29	21	21	15
Compression perpendicular to grain edgewise	$f_{c,90,edge,k}$	6	4	9	8
Tension parallel to grain	$f_{t,0,k}$	35	22	22	15
Shear edgewise parallel to grain	$f_{v,edge,0,k}$	4,2	3,2	4,5	3,6
Shear flatwise parallel to grain	$f_{v,flat,0,k}$	2,3	2,0	1,3	1,1
Size effect parameter	$s, [-]$	0,15	0,15	0,15	0,15
Mean stiffness values, N/mm²					
Modulus of elasticity parallel to grain	$E_{0,mean}$	13800	9600	10500	7200
Modulus of elasticity perpendicular to grain in flatwise bending	$E_{m,90,mean}$	-	-	2000	-
Shear modulus edgewise	$G_{0,edge,mean}$	600	500	600	500
Density, kg/m³					
Mean value	ρ_{mean}	510	440	510	440
Characteristic value	ρ_k	480	410	480	410

Kuva 9. LVL:n ominaislujuudet, jäykkyysominaisuudet sekä tiheydet (Puuteollisuus, 2020, s. 45).

$$f_{t,90,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{t,90,k}}{\gamma_M}$$

jossa		Kaava 1.
$f_{t,90,d}$	poikittaisen vetolujuuden mitoitusarvo	
k_{mod}	muunnoskerroin	
$f_{t,90,k}$	poikittaisen vetolujuuden ominaisarvo	
γ_M	materiaalin osavarmuuskerroin	

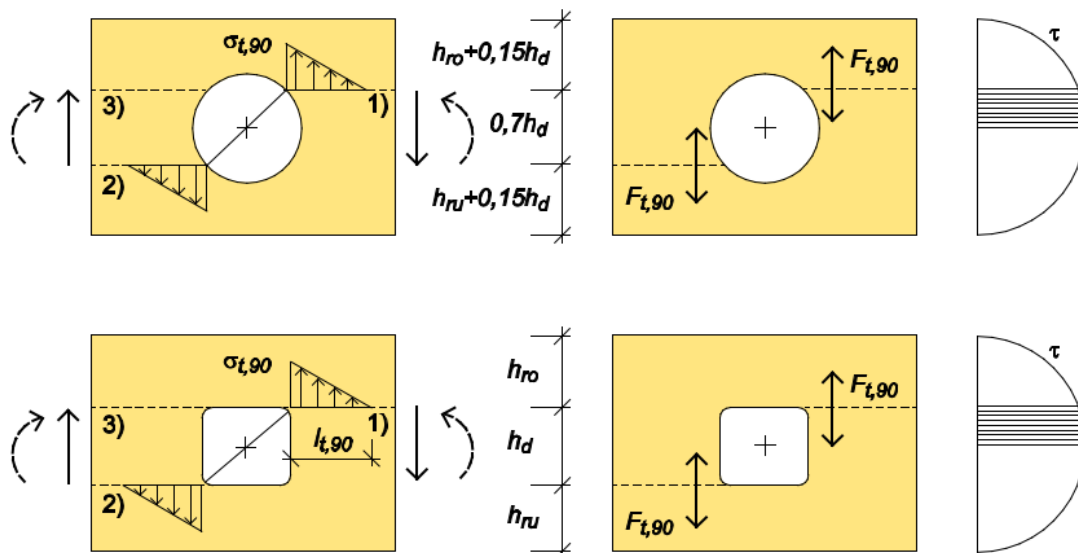
Kertoimella $k_{t,90}$ huomioidaan palkin korkeuden vaikutus reikien mitoitukseen. Palkin ollessa korkeampi kuin 450 mm, $k_{t,90}$ korottaa poikittaista vetojännitystä. (Blaß & Sandhaas, 2017, s. 231.) Kaavalla 2 ratkaistaan $k_{t,90}$ valitsemalla pienempi arvo tälle (RIL 205-1-2017, 2017, s. 95). Poikittainen veto oletetaan olevan kolmiomaisesti jakautunut reikien sivuille kuvan 10 mukaisella tavalla (Suomen Liimapuu yhdistys & Puuinfo, 2015a, kohta 5.3). Poikittaisen vetovoima jakauman pituus $l_{t,90}$ määritellään kaavalla 3, jossa valitaan tapauskohtaisesti oikea kaava (RIL 205-1-2017, 2017, s. 95). Kuva 10 havainnollistaa, mitä linjaa pitkin halkeama syntyy. Lisäksi kuvassa näkyy mitä eri muuttujat ovat.

$$k_{t,90} = \min \left\{ \frac{1}{\left(\frac{450}{h}\right)^{0,5}} \right.$$

jossa		Kaava 2.
$k_{t,90}$	kerroin	
h	palkin korkeus	

$$l_{t,90} = \begin{cases} 0,5 \cdot (h_d + h) & \text{Suorakaiteen muotoiset reiät} \\ 0,35 \cdot d + 0,5 \cdot h & \text{Pyöreät reiät} \end{cases}$$

jossa		Kaava 3.
$l_{t,90}$	poikittaisen vetojännitys alueen pituus	



Kuva 10. Kuvassa on esitetty selitykset eri muuttujille. Halkeama muodostuu linjoille 1) ja 2), kun hallitseva voima on leikkausvoima. Kun Taas linjat 1) ja 3) kun taivutusmomentti on hallitseva. (Suomen Liimapuuyhdistys & Puuinfo, 2015a, kohta 5.3.)

Halkeaman ala- tai yläpuolelle jäävä pienempi poikkileikkauksen korkeus h_r lasketaan kaavalla 4 (RIL 205-1-2017, 2017, s. 95). Tätä arvoa käytetään, kun lasketaan taivutusmomentista johtuvaa poikittaista vetoa. Pyöreillä rei'illä suurin vetojännitys esiintyy kohdassa, jossa ympyrän halkaisija on 45 asteen kulmassa. Tästä syystä pyöreiden reikien tapauksessa lisätään reiän ylä- ja alapuoliseen ehjän osan korkeuteen 15 prosenttia. (Blaß & Sandhaas, 2017, s. 230.)

$$h_r = \begin{cases} \min(h_{ro}; h_{ru}) & \text{Suorakaiteen muotoiset reiät} \\ \min(h_{ro} + 0,15 \cdot d; h_{ru} + 0,15 \cdot d) & \text{Pyöreät reiät} \end{cases}$$

jossa kaava 4.
 h_r halkeaman ala- tai yläpuolelle jäävä korkeus

Poikittaisen vetovoiman suunnitteluarvo saadaan leikkausvoiman komponentista kaavalla 5 ja taivutusmomentin komponentista kaavalla 6. Komponenttien laskemisessa käytetään reiän kohdalla vaikuttavaa leikkausvoiman ja taivutusmomentin suunnitteluarvoja. Poikittainen vetovoima saadaan, kun nämä komponentit lasketaan yhteen kuten kaavassa 7. (Blaß & Sandhaas, 2017, s. 229–230.) Tämän työn mitoittavana leikkausvoimana ja taivutusmomenttina käytetään suurimpia mahdollisia rasiuksia, jotka vaikuttavat reiän kohdalla, jolloin tämä on varman puolen oletus.

$$F_{t,V,d} = \frac{V_d \cdot h_d}{4 \cdot h} \cdot \left(3 - \frac{h_d^2}{h^2} \right)$$

jossa kaava 5.
 $F_{t,V,d}$ poikittainen vetovoiman komponentin suunnitteluarvo
 V_d leikkausvoiman mitoitusarvo
 h_d reiän korkeus, pyöreillä rei'illä $h_d = 0,7 \cdot d$

$$F_{t,M,d} = 0,008 \cdot \frac{M_d}{h_r}$$

jossa kaava 6.
 $F_{t,M,d}$ taivutusmomentin komponentin suunnitteluarvo
 M_d taivutusmomentin mitoitusarvo
 h_r reiän korkeus, pyöreillä rei'illä

$$F_{t,90,d} = F_{t,V,d} + F_{t,M,d}$$

jossa kaava 7.
 $F_{t,90,d}$ poikittainen vetovoiman suunnitteluarvo
 M_d taivutusmomentin mitoitusarvo
 h_r reiän korkeus, pyöreillä rei'illä

Kohtisuoraan syitä vasten vaikuttava mitoitusvetojännitys $\sigma_{t,90,d}$ lasketaan kaavalla 8. Palkin ominaisarvot löytyvät kuvista 8 ja 9. Tämän jälkeen kaavan 9 mitoitus ehto pitää täytyä. Mikäli poikittainen vetolujuus ylittyy, silloin palkkia voidaan vahvistaa. Poikittaisen vedon vahvistaminen on esitetty kohdassa 5.3. (RIL 205-1-2017, 2017, s. 94, 96.)

$$\sigma_{t,90,d} = \frac{F_{t,90,d}}{0,5 \cdot b \cdot k_{t,90} \cdot l_{t,90}}$$

jossa kaava 8.
 $\sigma_{t,90,d}$ poikittaisen vedon mitoitusvetojännitys
 b palkin leveys

$$\sigma_{t,90,d} \leq f_{t,90,d}$$

kaava 9.

5.1.2 Leikkauskestävyys

Palkin leikkauskestävyys lasketaan kaavan 10 mukaan (Puuinfo, 2020, s. 15). Reiän kohdalla leikkausmitoituksessa käytetään poikkileikkausta, jossa on mahdollisimman

pieni poikkileikkaus pinta-ala, eli esimerkiksi ympyrän muotoisen reiän keskikohdasta. Palkille lasketaan kaavalla 11 tehollinen leveys b_{eff} , joka ottaa huomioon taivutetun rakenteen halkeamisen kuivuessaan. Tähän käytetään k_{cr} -kerrointa, jotka ovat esitetty kuvassa 11. (RIL 205-1-2017, 2017, s. 74–75.)

$k_{cr} = 0,67$	<i>sahatavaralle lämmitetyissä sisätiloissa tai vastaavissa kosteusoloissa</i>
$k_{cr} = 1,0$	<i>liimapuulle lämmitetyissä sisätiloissa tai vastaavissa kosteusoloissa</i>
$k_{cr} = 1,0$	<i>sahatavaralle ja liimapuulle pysyvästi käyttöluokkaa 2 tai 3 vastaavissa kosteusoloissa</i>
$k_{cr} = 1,0$	<i>standardien EN 13986 ja EN 14374 mukaisille puutuotteille (puulevyt ja LVL)</i>

- o CLT:llä $k_{cr} = 1,0$.

Kuva 11. Kertoimen k_{cr} arvot esitettynä (RIL 205-1-2017, 2017, s. 75).

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M}$$

jossa		kaava 10.
$f_{v,90,d}$	leikkauslujuuden mitoitusarvo	
$f_{v,90,k}$	leikkauslujuuden ominaisarvo	

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

jossa		kaava 11.
b_{eff}	palkin tehollinen leveys	
k_{cr}	kerroin	

Reiän kohdalle pitää laskea myös poikkileikkauksen tehollinen korkeus h_{eff} , josta on vähennetty reiän osuus kaavalla 12. Palkin kohdalle lasketaan leikkausjännitys kaavalla 14. Tähän tarvitaan reiän kohdalta tehollinen poikkileikkausala, joka lasketaan kaavalla 13. Tehollinen poikkileikkausala saadaan tehollisesta korkeudesta ja tehollisesta leveydestä. (Puuinfo, 2019b, kohta 5.3.) Leikkausjännityksen mitoitus ehto on esitetty kaavassa 15. Jos tämä ehto ei täyty, niin pitää palkin poikkileikkausta kasvat-
taa. (RIL 205-1-2017, 2017, s. 74).

$$h_{eff} = h_{ro} + h_{ru}$$

jossa h_{eff} palkin tehollinen korkeus reiän kohdalla kaava 12.

$$A_{eff} = h_{eff} \cdot b_{eff}$$

jossa A_{eff} reiän kohdalla tehollinen poikkileikkaussala, joka vaikuttaa leikkauskestävyyteen kaava 13.

$$\tau_d = \frac{3 \cdot V_d}{2 \cdot A_{eff}}$$

jossa τ_d reiän kohdalla vaikuttava leikkausjännitys kaava 14.

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

kaava 15.

5.1.3 Puristus- ja vetokestävyys

Mikäli palkkiin kohdistuu syysuuntaisia puristus- ja/tai vetovoimia, pitää palkista tarkistaa kestävyudet näitä voimia vastaan (RIL 205-1-2017, 2017, s. 95). Mitoituksessa käytetään palkin syysuuntaan kohdistuvan normaalivoiman suunnitteluarvoa N_d . Syysuuntaisen puristuslujuuden mitoitusarvo lasketaan kaavalla 16 (Puuinfo, 2020, s. 15). Tähän saadaan ominaisarvot kuvista 8 ja 9. Tähän pitää myös määritellä nettopoikkileikkausala, joka poikkeaa hieman leikkaustarkastelun tehollisesta poikkileikkausala. Kaavalla 17 lasketaan puristus- ja vetokestävyuden tehollinen poikkileikkausala. (Suomen Liimapuuyhdistys & Puuinfo, 2015b, kohta 8.) Syysuuntainen mitoittava puristusjännitys saadaan laskettua kaavalla 18, jonka tulosta verrataan puristusjännityksen mitoitusehtoon kaavan 19 mukaan. Mikäli ei ehto täyty, niin pitää poikkileikkausta kasvattaa. (RIL 205-1-2017, 2017, s. 72.)

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M}$$

jossa $f_{c,0,d}$ puristuslujuuden mitoitusarvo kaava 16.
 $f_{c,0,k}$ puristuslujuuden ominaisarvo

$$A_n = h_{eff} \cdot b$$

jossa A_n kaava 17.
reiän kohdalla nettopoikkileikkaussala, joka vaikuttaa normaalivoimakestävyyteen

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_n}$$

jossa $\sigma_{c,0,d}$ kaava 18.
 N_d syy suuntainen mitoituspuristusjännitys
palkin normaalivoima

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

kaava 19.

LVL:n vetolujuus riippuu myös kokovaikutuskertoimesta k_l , joka saadaan kaavasta 20. Jos palkin kokonaispituus on alle 3000 mm, niin vetolujuutta korotetaan pituuden kokovaikutuskertoimella. Mikäli palkki on pidempi kuin 3000 mm, silloin k_l -kerroin pienentää vetolujuutta. Liimapuulla ei ole pituuden kokovaikutuskerrointa, joten liimapuun tapauksessa k_l -kerroin jätetään pois vetolujuutta laskiessa. LVL:n kerrointa k_l laskiessa tarvitaan kokovaikutuseksponentti s , joka saadaan kuvasta 9. (RIL 205-1-2017, 2017, s. 53, 55.) Syysuuntaisen vetolujuuden mitoitusarvo lasketaan kaavalla 21, jossa mukana on kokovaikutuskerroin (Puuinfo, 2020, s. 15). Ja kuten muissakin mitoituksissa, kuvista 8 ja 9 saadaan ominaisarvot kaavaan. Tämän jälkeen lasketaan syysuuntainen vetojännitys kaavalla 22 (Puuinfo, 2019b, kohta 5.4). Tämän mitoitusehto on kaavassa 23 (RIL 205-1-2017, 2017, s. 71).

$$k_l = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,1 \\ \left(\frac{3000 \text{ mm}}{L} \right)^{\frac{s}{2}} \end{array} \right.$$

jossa k_l kaava 20.
 L pituuden kokovaikutuskerroin (vain LVL)
 s palkin kokonaispituus
kokovaikutuseksponentti

$$f_{t,0,d} = k_{mod} \cdot \frac{k_l \cdot f_{t,0,k}}{\gamma_M}$$

jossa
 $f_{t,0,d}$ vetolujuuden mitoitusarvo
 $f_{t,0,k}$ vetolujuuden ominaisarvo

kaava 21.

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_d}{A_n}$$

jossa
 $\sigma_{t,0,d}$ syysuuntainen mitoitusvetojännitys

kaava 22.

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

kaava 23.

5.1.4 Taivutuskestävyys

Reiän kohdalla pitää selvittää myös taivutuskestävyys. Taivutuslujuuteen vaikuttaa korkeuden kokovaikutuskerroin k_h , joka vaikuttaa LVL- ja liimapuupalkilla. Kertoimella k_h on hieman materiaali kohtaisia eroja. LVL-palkin kokovaikutuskerroin toimii korottavana sekä pienentävänä tekijänä syrjätaivutuslujuuteen. Jos palkki on matalampi kuin 300 mm, niin lujuutta voidaan korottaa tällä kertoimella. Mikäli palkki on korkeampi kuin 300 mm, niin lujuutta pienennetään. Kaavassa 24 on esitetty miten LVL:n k_h -kerroin lasketaan. Liimapuulla k_h -kerroin on vain korotuskerroin. Liimapuupalkin ollessa alle 600 mm, voidaan taivutuslujuutta suurentaa k_h -kertoimella, kuten kaavassa 25 on esitetty. (RIL 205-1-2017, 2017, s. 53–54.)

$$k_h = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,2 \\ \left(\frac{300 \text{ mm}}{h} \right)^s \end{array} \right.$$

jossa
 k_h LVL:n korkeuden kokovaikutuskerroin

kaava 24.

$$k_h = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,1 \\ \left(\frac{600 \text{ mm}}{h} \right)^{0,1} \end{array} \right.$$

jossa
 k_h liimapuun korkeuden kokovaikutuskerroin

kaava 25.

Liimapuulla on vielä k -kerroin, jolla voidaan myös korottaa taivutuslujuutta. Liimapuun lamellin paksuuden t ollessa alle 40 mm, voidaan tällöin korottaa taivutuslujuutta k -kertoimella. Kaavalla 26 määritellään k -kerroin. (RIL 205-1-2017, 2017, s. 54.)

$$k = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,05 \\ \left(\frac{40 \text{ mm}}{t} \right)^{0,1} \end{array} \right.$$

jossa
 k kerroin
 t lamellin paksuus

kaava 26.

Taivutuslujuuden mitoitusarvo määritellään kaavalla 27, johon ominaisarvot löytyvät kuvista 8 ja 9 (Puuinfo, 2020, s. 15). Mitoituksessa käytetään reiän kohdalta suurinta taivutusmomenttia ja poikkileikkausta, jossa on pienin poikkileikkausala. (Puuinfo, 2019b, kohta 5.5.)

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{k_h \cdot f_{m,k}}{\gamma_M}$$

jossa
 $f_{m,d}$ taivutuslujuuden mitoitusarvo
 $f_{m,k}$ taivutuslujuuden ominaisarvo

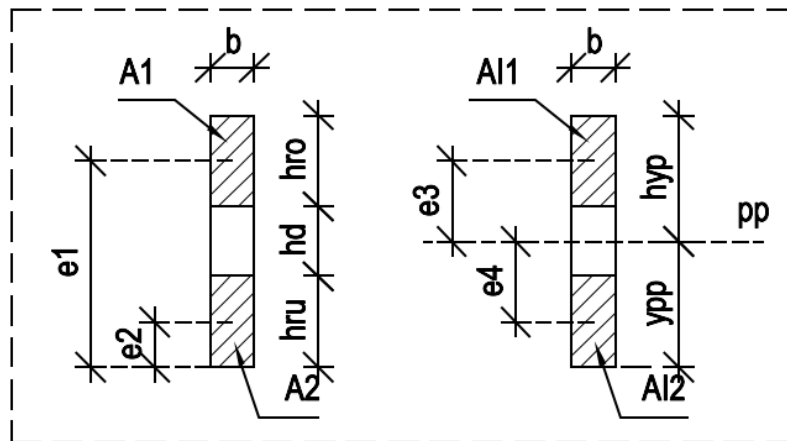
kaava 27.

Tässä työssä käytetään kuvassa 12 esitettyjä muuttujia, kun lasketaan taivutusjännitystä. Reiän kohdalla taivutusjännityksen laskeminen alkaa poikkileikkauksen painopisteen sijainnin y_{pp} laskemisella. Kaavalla 28 lasketaan poikkileikkauksen neutraaliakseli eli painopiste. (Puuinfo, 2019b, kohta 5.5.)

$$y_{pp} = \frac{A_1 \cdot e_1 + A_2 \cdot e_2}{A_1 + A_2}$$

jossa
 y_{pp} painopisteen sijainti alareunasta mitattuna
 A_i poikkileikkauksen osapinta-ala
 e_i osapinta-alan keskiö alareunasta mitattuna

kaava 28.



Kuva 12. Tässä on esitetty selitykset eri muuttujille

Taivutusjännitys lasketaan painopiteen ylä- ja alapuolelta, jolloin saadaan selville, kumpi on määräävä. Jännitystä laskettaessa tarvitaan rakenteen tehollinen neliömomentti. Koska kyseessä on reiällinen poikkileikkaus, tehollinen neliömomentti ratkaistaan Steinerin lauseella, jota on sovellettu kaavassa 30. Kun tiedetään koko poikkileikkauksen painopiteen sijainti, tätä kautta saadaan selvitettyä neliömomenttiin vaikuttavien osapintojen keskipisteiden sijainnit painopisteeseen kuvan 12 mukaan. Osapintojen neliömomenttia laskettaessa sovelletaan yleistä suorakaidepoikkileikkauksen kaavaa 29. (Puuinfo, 2019b, kohta 5.5.)

$$I_i = \frac{b \cdot h_i^3}{12}$$

jossa

I_i

osapinnan neliömomentti

h_i

osapinnan korkeus

kaava 29.

$$I_{eff} = I_1 + A_{11} \cdot e_3^2 + I_2 + A_{12} \cdot e_4^2$$

jossa

I_{eff}

poikkileikkauksen tehollinen neliömomentti

kaava 30.

Kun tiedetään tehollinen neliömomentti, voidaan selvittää palkin taivutusjännitykset reiän kohdalla. Kaavalla 31 lasketaan palkin alareunalle kohdistuva suurin taivutusjännitys ja kaavalla 32 palkin yläreunan jännitys. Näistä määrääväksi jännitykseksi valitaan suurempi jännitys, jota verrataan kaavan 33 mitoitusehtoon. (Puuinfo, 2019b, kohta 5.5.)

$$\sigma_a = M_d \cdot \frac{y_{pp}}{I_{eff}}$$

jossa σ_a poikkileikkauksen alareunan taivutusjännitys kaava 31.

$$\sigma_y = M_d \cdot \frac{h - y_{pp}}{I_{eff}}$$

jossa σ_y poikkileikkauksen yläreunan taivutusjännitys kaava 32.

$$\max(\sigma_a, \sigma_y) \leq f_{m,d}$$

kaava 33.

5.1.5 Yhteisvaikutus

Lopuksi poikkileikkauksesta pitää yhteisvaikutus ehdot tarkistaa. Yhteisvaikutusehdot on esitetty alapuolella. Kaavalla 34 tarkistetaan taivutuksen ja vedon yhteisvaikutus. Puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutus tarkistetaan kaavalla 35. Nämä ehdot pitää myös täyttyä, jotta reikä voidaan toteuttaa. (RIL 205-1-2017, 2017, s. 77–78.)

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\max(\sigma_a, \sigma_y)}{f_{m,d}} \leq 1,0$$

kaava 34

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\max(\sigma_a, \sigma_y)}{f_{m,d}} \leq 1,0$$

kaava 35

5.2 Sahatavarapalkki

Sahatavaran mitoituksessa ei huomioida poikittaista vetojännitystä toisin kuin liimapuulla ja LVL-palkilla. Sahatavaraan saa tehdä pyöreän reiän, jonka halkaisija on enintään $d = 30$ mm. Mitoitusehdot ovat tässä tapauksessa samat kuin liimapuulla ja LVL-palkilla. Reiän keskiöetäisyys palkin ylä- ja alareunasta vähintään $3d$ ja palkin päähän

etäisyys vähintään $5d$. Jos reikiä on enemmän, pitää reikien keskiöetäisyys olla vähintään $5d$ syysuunnassa ja syysuuntaa vastaan $3d$. Ehtojen täytyttyä, mitoituksessa tarkastellaan vain leikkauskestävyys, puristus- ja vetokestävyys sekä taivutuskestävyys. Myös yhdistettyjen jännitysten ehdot pitää tarkistaa. (RIL 205-1-2017, 2017, s. 95.)

Leikkauskestävyys, puristus- ja vetokestävyys sekä taivutuskestävyys lasketaan samoin kuin aiemminkin, mutta materiaali aiheuttaa pientä eroavaisuutta liimapuuhun ja LVL:ään verrattuna. Leikkauskestävyyttä laskettaessa, kuvasta 11 valitaan sahatavarelle oikea k_{cr} -kerroin. Taivutusjännitykseen vaikuttaa k_h -kerroin (kaava 36), jolla voidaan suurentaa taivutuslujuutta, mikäli palkin korkeus on alle 150 mm. (RIL 205-1-2017, 2017, s. 50, 95.) Kuvasta 13 saadaan lujuuksien ominaisarvot kestävyyksien laskentaan.

$$k_h = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,3 \\ \left(\frac{150 \text{ mm}}{h} \right)^{0,2} \end{array} \right.$$

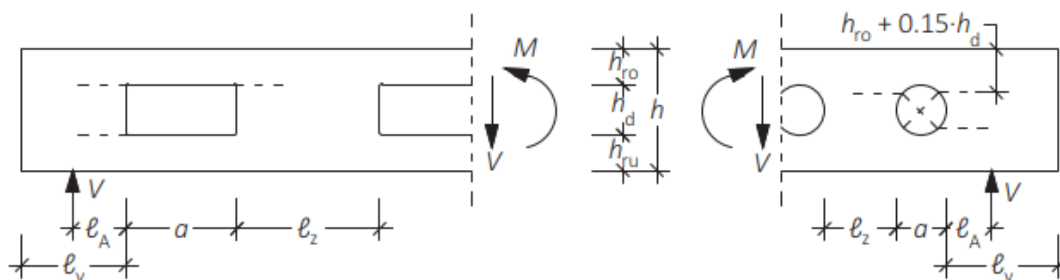
kaava 36.

Lujuusluokka		C14 T0	C18 T1	C24 T2	C30 T3	C35 ¹⁾	C40 ¹⁾
Ominaislujuudet (N/mm ²)							
Taivutus	$f_{m,k}$	14	18	24	30	35	40
Veto	$f_{t,0,k}$	7,5	10	14,5	19	22,5	26
	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Puristus	$f_{c,0,k}$	16	18	21	24	25	27
	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,5	2,7	2,7	2,8
Leikkaus	$f_{v,k}$	3,0	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0
Jäykkyysominaisuudet (N/mm ²)							
Kimmo- moduuli	$E_{0,mean}$	7 000	9 000	11 000	12 000	13 000	14 000
	$E_{0,05}$	4 700	6 000	7 400	8 000	8 700	9 400
	$E_{90,mean}$	230	300	370	400	430	470
Liukumoduuli	G_{mean}	440	560	690	750	810	880
	$G_{0,05}$	300	380	460	500	540	590
Tiheydet (kg/m ³)							
Ominaisitiheys	ρ_k	290	320	350	380	390	400
Tiheyden keskiarvo	ρ_{mean}	350	380	420	460	470	480

Kuva 13. Sahatavaran ominaislujuudet, jäykkyysominaisuudet sekä tiheydet (RIL 205-1-2017, 2017, s. 51).

5.3 Reikien vahvistaminen

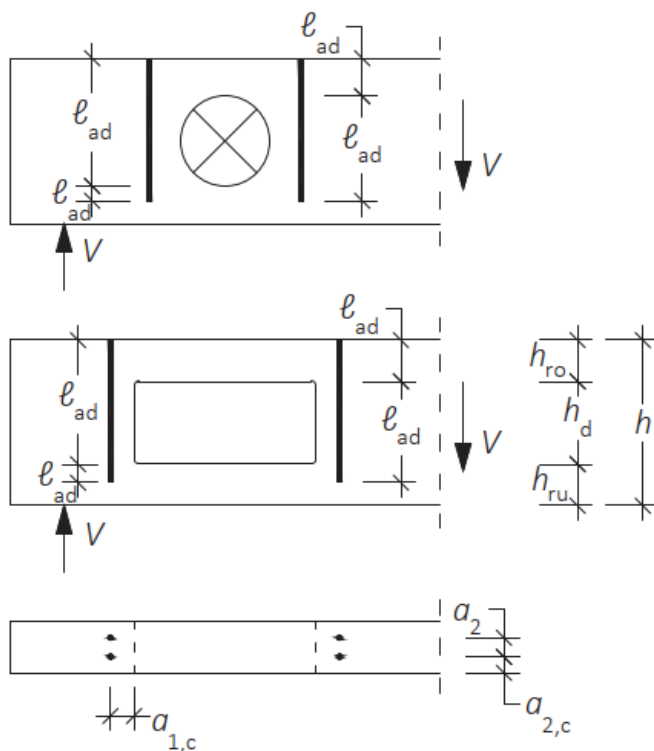
Reikien vahvistamisessa pitää myös tarkistaa voimassaoloehdot, jotka on esitetty kuvassa 15 ja selitykset kuvassa 14. Lisäksi suorakaidereian kulmien pyöristyssäde r pitää olla vähintään 15 mm. Vahvistaa voi ainoastaan liimapuuta tai LVL-palkkia. Reikien vahvistaminen tehdään poikittaista vetoa vastaan. Mikäli reiän poikittainen vetojännitys $F_{t,90,d}$ ylittyy, voidaan sitä vahvistaa erilaisin menetelmin. Palkin sisäpuoleiset vahvistustavat ovat esimerkiksi liimatangot, liimatut raudoitusteräket ja täyskierteiset ruuvit. Ulkopuoleiset vahvistustavat ovat kylkiin reiän kohdille liimatut vaneri- tai LVL-levyt ja kylkiin kiinnitettyt rei'itetty metallilevyt. Kuvissa 16 ja 17 havainnollistetaan erilaiset vahvistamistavat. (Blaß & Sandhaas, 2017, s. 263, 269–270.) Tässä työssä käsitellään täyskierteinen ruuvi- ja liimatanko vahvistaminen sekä kylkiin liimattavilla vanereilla vahvistaminen.



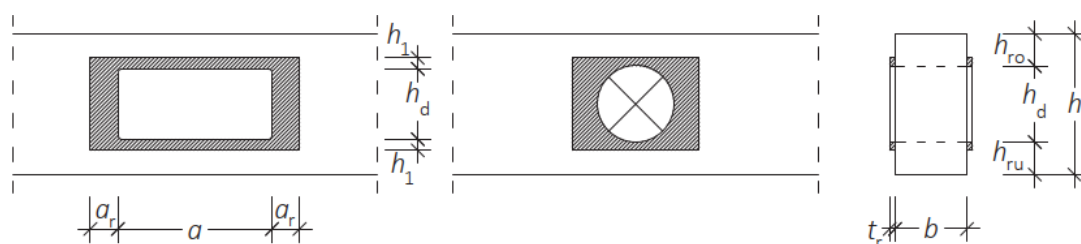
Kuva 14. Selitykset muuttujille, jotka esitetään kuvassa (Blaß & Sandhaas, 2017, s. 270).

$l_v \geq h$	$l_z^c \geq h$, but at least 300 mm	$l_A \geq h/2$	$h_{ro(ru)} \geq 0.25 \cdot h$	$a \leq h$	$h_d \leq 0.3 \cdot h^a$
				$a/h_d \leq 2.5$	$h_d \leq 0.4 \cdot h^b$

Kuva 15. Vahvistettujen reikien voimassaoloehdot. ^a sisäinen vahvistaminen, ^b ulkoinen vahvistaminen, ^c l_z = kahden vierekkäisen. (Blaß & Sandhaas, 2017, s. 270.)



Kuva 16. Palkin sisäinen vahvistamien ja siihen liittyvät muuttujat (Blaß & Sandhaas, 2017, s. 271).



Kuva 17. Palkin ulkoinen vahvistamien ja siihen liittyvät muuttujat (Blaß & Sandhaas, 2017, s. 271).

5.3.1 Ruuvivahvistus

Kun palkin vahvistamaton poikittainen veto $F_{t,90,d}$ ylittyy, vahvistaminen voidaan tehdä täyskierteisillä ruuveilla. Tässä työssä käytetään SPAX:n ruuveja, ja mitoitus on kyseisen valmistajan ETA-dokumentista.

Reiän molemmille puolille asetetaan saman verran vahvistusruuveja. Laskennassa ruuvien lukumääränä käytetään vain yhdellä puolella rivissä olevien ruuvien määrää n . Tämän avulla lasketaan ruuvien tehollinen lukumäärä n_{ef} , joka huomioi useampien ruuvien tapauksessa, epätasaisesti jakautuneen kuormituksen ruuveille. (Blaß &

Sandhaas, 2017, s. 271.) Tehollinen ruuvien lukumäärä saadaan kaavasta 37. Ruuvien ulosvedolle lasketaan ominaiskapasiteetti $F_{ax,Rk}$ kaavalla 38. Tähän tarvitaan ruuvien ominaisulosveto parametri $f_{ax,k}$, joka saadaan kuvasta 18, kun tiedetään ruuvien kierteen halkaisija d . Ruuvien tehollinen pituus l_{ef} esitetään kuvassa 16 muuttujana l_{ad} . Näistä valitaan pienin arvo, joka valitaan määrääväksi teholliseksi pituudeksi. Huomaa, että ruuvit voidaan asettaa myös kuvan 20 tavalla, jolloin se pitää huomioida ruuvien tehollisessa pituudessa. Puun ominaistiheys ρ_k määräytyy palkin mukaan, joka saadaan kuvista 8 ja 9. (ETA-12/0114, 2020, s. 8.)

$f_{ax,k}$	Characteristic withdrawal parameter
$2,5 \text{ mm} \leq d < 6,0 \text{ mm}$:	$f_{ax,k} = 14,0 \text{ N/mm}^2$
$6,0 \text{ mm} \leq d \leq 8,0 \text{ mm}$:	$f_{ax,k} = 12,0 \text{ N/mm}^2$
$d = 10,0 \text{ mm}$:	$f_{ax,k} = 11,5 \text{ N/mm}^2$
$d = 12,0 \text{ mm}$:	$f_{ax,k} = 11,0 \text{ N/mm}^2$
$d = 16,0 \text{ mm}$:	$f_{ax,k} = 10,0 \text{ N/mm}^2$

Kuva 18. ruuvien ominaisvetolujuus SPAX:n ruuveilla (ETA-12/0114, 2020, s. 8).

$$n_{ef} = \max \left\{ \begin{array}{l} n^{0,9} \\ 0,9 \cdot n \end{array} \right.$$

jossa	kaava 37.
n_{ef}	ruuvien tehollinen lukumäärä reiän toisella puolella
n	ruuvien lukumäärä reiän toisella puolella

$$F_{ax,Rk} = n_{ef} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot \left(\frac{\rho_k}{350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^{0,8}$$

jossa	kaava 38.
$F_{ax,Rk}$	ruuvien suuntainen ulosveto ominaiskapasiteetti
$f_{ax,k}$	ruuvien ominaisvetolujuus
d	ruuvien kierteen halkaisija
l_{ef}	ruuvien tehollinen pituus (kuvassa 16 l_{ad})
ρ_k	palkin ominaistiheys

Kun on saatu ruuvien ulosvedon ominaiskapasiteetti, sille pitää laskea suunnittelu kapasiteetti $F_{ax,Rd}$ kaavalla 39. Tällä on sama kaava kuin muissakin tapauksissa, joissa lasketaan suunnittelulujuutta. Erona on ainoastaan osavarmuuskertoimessa γ_M , koska tässä tapauksessa valitaan liitoksen osavarmuuskertoimen taulukosta 3. (Puuinfo, 2020, s. 15.) Lopuksi tarkistetaan ruuvivahvistamisen mitoitusehto kaavalla 40 (ETA-12/0114, 2020, s. 94).

$$F_{ax,Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{ax,Rk}}{\gamma_M}$$

jossa kaava 39.
 $F_{ax,Rd}$ ruuvin suuntainen ulosveto suunnittelukapasiteetti
 k_{mod} muunnoskerroin
 γ_M liitoksen osavarmuuskerroin

$$F_{t,90,d} \leq F_{ax,Rd}$$

kaava 40.

Ruuvista pitää varmistaa myös ruuvin teräksen suunnitteluvetolujuus $F_{tens,d}$ (kaava 41), koska tämä voi tulla myös määrääväksi jännitykseksi. Tähän tarvitaan ruuvin ominaisvetolujuus $f_{tens,k}$. Kuvassa 19 on esitetty SPAX:n ominaisvetolujuudet hiiliteräsruuveille. Kyseisen valmistajan ETA:ssa on vielä lisää arvoja mm. kierretangolle ja ruostumattomille ruuveille. Poikittaista vetojännitystä verrataan ruuvin vetolujuuteen kaavalla 42, ja tämän ylittyessä voidaan kokeilla suurempia ruuveja. Mikäli ruuvia tässä vaiheessa vaihdetaan, pitää myös ulosvetokapasiteetti tarkistaa. (SPAX Pacific, 2020, kohta Tensile strength of the steel.)

d = 2,5 mm:	1,8 kN
d = 3,0 mm:	2,6 kN
d = 3,5 mm:	3,8 kN
d = 4,0 mm:	5,0 kN
d = 4,5 mm or 4,6 mm:	6,4 kN
d = 5,0 mm or 5,2 mm:	7,9 kN
d = 5,6 mm:	9,9 kN
d = 6,0 mm:	11 kN
d = 7,0 mm:	13 kN
d = 8,0 mm:	17 kN
d = 10,0 mm:	28 kN
d = 12,0 mm:	38 kN

Kuva 19. SPAX:n ominaisvetokestävyydet hiiliteräsruuveille (ETA-12/0114, 2020, s. 9).

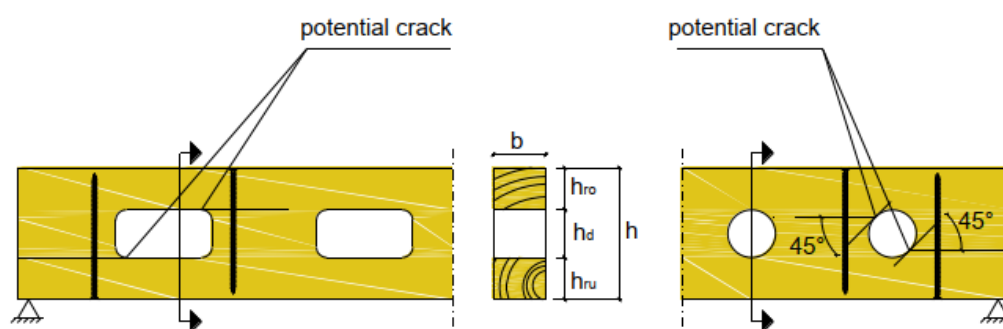
$$F_{tens,d} = n_{ef} \cdot \frac{f_{tens,k}}{\gamma_M}$$

jossa kaava 41.
 $F_{tens,d}$ ruuvin vetokestävyyden suunnittelu-arvo
 $f_{tens,k}$ ruuvin vetokestävyyden ominaisarvo
 γ_M liitoksen osavarmuuskerroin

$$F_{t,90,d} \leq F_{tens,d}$$

kaava 42.

Ruuvit asetetaan reiän sivuille kuvan 16 mukaan yhteen riviin, niin että reunaetäisyys reiän reunasta $a_{1,c} \geq 5d$ ja ruuvien keskiöetäisyys $a_2 \geq 5d$. Ruuvien reunaetäisyys palkin reunalle $a_{2,c} \geq 4d$. Mikäli ruuveilla on CUT- tai 4CUT-poräkärki, niin $a_{2,c} \geq 3d$. Ruuvit voidaan laittaa palkkiin molemmat ruuvirivit samalta puolelta kuvan 16 mukaan tai laittamalla ruuvirivit eripuolilta palkkia kuva 20 tavalla. Tässä yhteydessä d on ruuvin halkaisija. (ETA-12/0114, 2020, s. 86, 94.)



Kuva 20. Ruuveille toinen asettamistapa (ETA-12/0114, 2020, s. 94).

5.3.2 Liimatankovahvistus

Toinen käsiteltävä vahvistustapa on vahvistamine liimatangoilla. Liimatangot voivat olla täysikierteisiä tankoja tai raudoitusteräksiä, joita käytetään betonirakentamisessa. Tässäkin vahvistamisessa liimatangon tehollinen pituus l_{ad} määräytyy samoin kuin edellisessä ruuvivahvistuksessa. Tehollisen pituuden mukaan saadaan määritettyä porareian ja liimatangon liimasauman ominaislujuus kaavalla 43. (Blaß & Sandhaas, 2017, s. 267–268.) Liimasauman suunnittelulujuus lasketaan kaavalla 44 (Puuinfo, 2020, s. 15).

$$f_{k1,k} = \begin{cases} 4,0 \text{ MPa} & l_{ad} \leq 250 \text{ mm} \\ (5,25 \cdot 0,005 \cdot l_{ad}) \text{ MPa} & 250 \text{ mm} < l_{ad} \leq 500 \text{ mm} \\ (3,5 \cdot 0,0015 \cdot l_{ad}) \text{ MPa} & 500 \text{ mm} < l_{ad} \leq 1000 \text{ mm} \end{cases}$$

jossa

 $f_{k1,k}$ l_{ad}

kaava 43.
porareian ja tangon välisen liimasauman ominaislujuus
liimatangon tehollinen pituus

$$f_{k1,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{k1,k}}{\gamma_M}$$

jossa kaava 44.
 $f_{l,d}$ porareian ja tangon välisen liimasauman suunnittelulujuus
 γ_M liitoksen osavarmuuskerroin

Liimasaumalle lasketaan tehollinen suunnittelujännitys $\tau_{ef,d}$ kaavalla 45. Tämän selvittämiseksi tarvitaan tankojen lukumäärä n rivissä yhdellä puolella reikää ja tangon halkaisija. Tangon halkaisija d_r on rajoitettu enintään 20 mm, eli tätä suurempaa tanko ei saa käyttää vahvistamisessa. Liimasauman tehollista jännitystä verrataan liimasauman lujuuteen kaavassa 46 olevan ehdon mukaan. (Blaß & Sandhaas, 2017, s. 267, 270.)

$$\tau_{ef,d} = \frac{F_{t,90,d}}{n \cdot d_r \cdot \pi \cdot l_{ad}}$$

jossa kaava 45.
 $\tau_{ef,d}$ tehollinen liimasauman suunnittelujännitys
 n liimatankojen määrä yhdellä puolella reikää
 d_r liimatangon halkaisija

$$\tau_{ef,d} \leq f_{k1,d}$$

kaava 46.

Liimatangot asetellaan kuvan 16 mukaan yhteen riviin. Tangon keskipisteen ja reiän reunana etäisyys $a_{1,c} \geq 2,5d$ ja tankojen välinen keskiöetäisyys $a_2 \geq 3d$. Liimatankojen keskiöetäisyys pakin reunaan on $a_{2,c} \geq 2,5d$. Tässä yhteydessä d on tangon halkaisija. (Blaß & Sandhaas, 2017, s. 267.)

5.3.3 Levyvahvistus

Viimeinen käsiteltävä vahvistustapa on ulkoinen reiän vahvistaminen vanerilla. Levyvahvistaminen on esitetty kuvassa 17, jossa on myös siihen liittyvät muuttujat. Levyt pitää laittaa molemmille puolille palkkia ja levyt asetetaan keskeisesti reiän kohdalle. Mitoituksen kannalta on myös järkevää, että levyn syysuunta on poikittain palkin syysuuntaan nähden. Tällöin levyille saadaan suuremmat lujuudet poikittaista vetoa vastaan. Vahvistuslevylle on myös asetettu mittaehtoja, jotka pitää täytyä. Yhden levyn

paksuus t_r on oltava vähintään 10 mm. (Suomen Liimapuu yhdistys & Puuinfo, 2015a, kohta 5.4.) Taulukossa 4 on vahvistuslevyn mittaehdot, jotka pitää täyttyä.

Taulukko 4. Vahvistuslevyn mittaehdot (Blaß & Sandhaas, 2017, s. 272).

Vahvistuslevyn ehdot
$0,25 \cdot a \leq a_r \leq 0,6 \cdot l_{t,90}$
$h_1 \geq 0,25 \cdot a$

Kaavalla 47 määritellään vahvistuslevyn ja palkin välisen liimasauman suunnittelulujuus $f_{l2,d}$, jonka ominaislujuus $f_{l2,k}$ on $0,75 \text{ N/mm}^2$ (Puuinfo, 2020, s. 15). Jotta voidaan laskea tehollinen liimasauman suunnittelulujuus (kaava 49), tarvitaan tähän reiän sivuilla olevan levyn pituus a_r , sekä halkeaman ylä- ja alapuolella olevan osan korkeus h_{ad} . Tämä saadaan kaavasta 48. Koska levyjä on molemmilla puolilla, siksi kaavassa on kerroin 2. Kun tiedetään liimasauman mitoitusjännitys, tarkistetaan mitoitusehto, joka on kaavassa 50. (Blaß & Sandhaas, 2017, s. 268, 271–272.)

$$f_{k2,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{k2,k}}{\gamma_M}$$

jossa	kaava 47.
$f_{l2,d}$	vahvistuslevyn ja palkin välisen liimasauman suunnittelulujuus
$f_{l2,k}$	vahvistuslevyn ja palkin välisen liimasauman ominaislujuus = $0,75 \text{ N/mm}^2$
γ_M	liitoksen osavarmuuskerroin

$$h_{ad} = \begin{cases} h_1 & \text{Suorakaiteen muotoiset reiät} \\ h_1 + 0,15 \cdot h_d & \text{Pyöreät reiät} \end{cases}$$

jossa	kaava 48.
h_{ad}	halkeaman ylä- ja alapuolelle jäävä levyn korkeus

$$\tau_{ef,d} = \frac{F_{t,90,d}}{2 \cdot a_r \cdot h_{ad}}$$

jossa	kaava 49.
$\tau_{ef,d}$	tehollinen liimasauman suunnittelujännitys

$$\tau_{ef,d} \leq f_{k2,d}$$

kaava 50.

Kuten ruuveillakin tarkistettiin niiden vetokestävyys, niin tässä tarkistetaan myös vanerin vetokestävyys oletetun halkeaman kohdalla. Kaavalla 51 lasketaan vahvistuslevyn mitoitusvetolujuus ja tähän kaavaan saadaan ominaislujuus taulukosta 5 (Puuinfo, 2020, s. 15). Taulukossa 5 olevat ominaisarvot ovat vanerin syysuunnan lujuuksia. Levyä rasittava vetojännitys saadaan laskettua kaavalla 52. Tähän kaavaan tarvitaan oletetun halkeaman kohdalla olevan levyn poikkileikkaus. Tämä saadaan reiän sivulla olevasta levyn leveydestä ja levyn paksuudesta. Kaavassa 53 on levyn vetokestävyysmitoitusehto. Tässä ehdossa on mukana k_k -kerroin, joka ottaa huomioon epätasaisesti jakautuneet jännitykset. Tämä k_k -kerroin voidaan ilman lisätarkasteluita todeta olevan 2. (Blaß & Sandhaas, 2017, s. 272.)

Taulukko 5. Mitoituksessa käytettävän suomalaisen ohutviiluisenvanerin ominaisvetokestävyudet (RIL 205-1-2017, 2017, s. 58).

Paksuudet t (mm)	12	15	18	21	24	27	30
Ominaislujuudet (N/mm ²)							
Veto	$f_{t,0,k}$	14,9	14,8	14,6	14,5	14,5	14,4

$$f_{t,0,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M}$$

jossa
 $f_{t,0,d}$ vahvistuslevyn suunnitteluvetolujuus
 $f_{t,0,k}$ vahvistuslevyn ominaisvetolujuus
 γ_M materiaalin osavarmuuskerroin

kaava 51.

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{F_{t,90,d}}{2 \cdot a_r \cdot t_r}$$

jossa
 $\sigma_{t,0,d}$ vahvistuslevyn mitoitusvetojännitys
 t_r vahvistuslevyn paksuus

kaava 52.

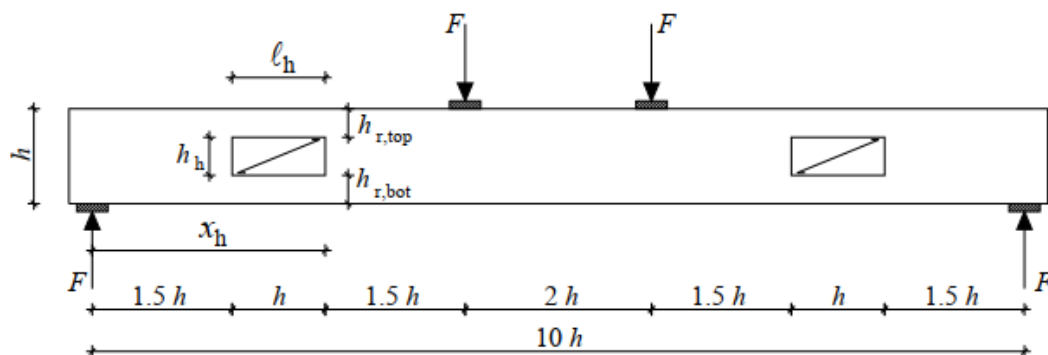
$$k_k \cdot \sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d}$$

jossa
 k_k kerroin ($k_k = 2$, ilman lisätarkasteluita)

kaava 53.

5.4 CLT-palkit

CLT-rakenteet eivät sisälly Eurokoodi 5, vaan ne suunnitellaan eurooppalaisten teknisten hyväksyntöjen (ETA) mukaan. Jokainen valmistaja hakee erikseen hyväksynnän omille tuotteilleen niiden ominaisuuksien sekä mitoituksen osalta. (Jelec ym., 2016, s. 1.) Tällä hetkellä ETA-dokumenteista ei löydy mitoitusohjeita palkeille, jonka vuoksi tässä työssä tutkitaan Saksassa tehtyä tutkimusta. Tutkimus on toteutettu Saksan Karlsruhen teknillisessä instituutissa. Tutkimuksen tarkoituksena on ollut kehittää yksinkertaistettuja menetelmiä mitoittaa reiällisen CLT-palkin sisäisiä jännitystiloja. Raportissa käsitellään reiällisen CLT-palkin käyttäytymistä pistekuormilla kuvan 21 tapauksen mukaisesti. (Flaig, M., 2014, kohta 1.)



Kuva 21. Tutkimuksessa käsitellyn tapauksen havainnekuva, jossa on esitetty laskennassa käytettäviä muuttujia. (Flaig, M., 2014, kohta 3.2.1).

Tutkimuksessa kävi ilmi, että rakenne pettää todennäköisimmin leikkausjännitysten vuoksi, kuin pienennetyn poikkileikkauksen taivutusjännityksen vuoksi. Taivutusjännitys tarkastelut tehdään palkin pitkittäislamellien mukaan. Tarkastelu suoritetaan palkin ehjällä osalla kaavalla 54 ja palkissa esiintyvän reiän reunalla, joka on esitetty kuvassa 21 muuttujalla χ_h lasketaan kaavalla 56. Taivutusjännitys pitkittäisissä lamelloissa $\sigma_{m,net}$ lasketaan rakenteesta olevasta suurimmasta pistekuormasta F_{max} . Lisäksi tarvitaan rakenteen poikkileikkauksen palkin suuntaisten lamellien yhteenlaskettu leveys $t_{net,long}$ sekä koko palkin korkeus h . Reiän reunalle muodostuvaa taivutusjännitystä $\sigma_{m,net,h}$ laskettaessa tarvitaan reiän ylä- tai alapuolelle jäävä matalampi jäännöskorkeus h_r , joka saadaan kaavasta 55 sekä reiän korkeutta h_h . (Flaig, M., 2014, kohta 3.2.2.)

$$\sigma_{m,net} = \frac{24 \cdot F_{max}}{t_{net,long} \cdot h}$$

jossa kaava 54.
 $\sigma_{m,net}$ taivutusjännitys pitkittäisissä kerroksissa
 F_{max} kokonaiskuorma
 $t_{net,long}$ pitkittäislamellien yhteenlaskettu leveys
 h palkin kokonaiskorkeus

$$h_r = \min \begin{cases} h_{r,top} \\ h_{r,bot} \end{cases}$$

jossa kaava 55.
 h_r mitoituksessa huomioitava jäännöskorkeus
 $h_{r,top}$ reiän yläpuolella oleva jäännöskorkeus
 $h_{r,bot}$ reiän alapuolella oleva jäännöskorkeus

$$\sigma_{m,net,h} = \frac{15 \cdot F_{max} \cdot h^2}{t_{net,long} \cdot (h^3 \cdot h_h^3)} + \frac{3 \cdot F_{max} \cdot h}{2 \cdot t_{net,long} \cdot h_r^2}$$

jossa kaava 56.
 $\sigma_{m,net,h}$ taivutusjännitys pitkittäisissä kerroksissa reiän reunalla
 h_h reiän korkeus

Reikään kohdistuu poikittaista vetoa samoin, kuin edellä mainittuihin materiaaleihin. CLT-palkissa nämä jännitykset otetaan vastaan poikittaisilla lamelleilla. Poikittainen vetovoima $F_{t,90}$ saadaan laskettua kaavalla 57, joka huomioi leikkauksen ja taivutuksen. Poikittainen vetovoima tarkastellaan reiän reunalla, jonka vuoksi pitää selvittää reiän pidemmällä olevan reunan etäisyys tuelta χ_h . Poikittaisen vetojännityksen $\sigma_{t,0,cross}$ selvittämiseen tarvitaan poikittaisten lamellien tehollinen leveys a_r kaavan 58 mukaisesti. Kerroin k_k toimii samalla tavalla tässä, kuin levyvahvistamisessakin. Kertoimelle voidaan aina käyttää arvoa 2 ilman lisätarkasteluja. Poikittaisten lamellien yhteenlaskettu paksuus $t_{net,cross}$ vaikuttaa myös poikittaiseen vetojännitykseen, joka saadaan kaavasta 59. (Flaig, M., 2014, kohta 3.2.2.)

$$F_{t,90} = F_{max} \cdot \left(\left(\frac{3 \cdot h_h}{4 \cdot h} - \frac{h_h^3}{4 \cdot h^3} \right) + \left(\frac{0,008 \cdot \chi_h}{h_r} \right) \right)$$

jossa kaava 57.
 $F_{t,90}$ poikittainen vetovoima
 χ_h reiän reunan etäisyys tuelta

$$a_r = \min \left\{ \begin{array}{l} b_{cross} \\ 0.3 \cdot (h + h_h) \end{array} \right.$$

jossa kaava 58.
 a_r poikittaisen lamellin tehollinen leveys
 b_{cross} poikittaislamellin leveys

$$\sigma_{t,0,cross} = k_k \cdot \frac{F_{t,90}}{a_r \cdot t_{net,cross}}$$

jossa kaava 59.
 $\sigma_{t,0,cross}$ poikittainen vetojännitys
 k_k kerroin
 $t_{net,cross}$ poikittaisten lamellien yhteen laskettu paksuus

Leikkausjännitysten arvioinnissa huomioitiin kolme erilaista murtumistilaa. Ensimmäisessä tarkastelussa käydään läpi bruttopoikkileikkauksen leikkausjännitys, toisessa nettopoikkileikkauksen ja viimeisenä risteysalueiden leikkausjännitykset. Ensimmäisessä tarkastelussa bruttopoikkileikkauksen leikkausjännitys $\tau_{xz,gross,h}$ saadaan selville kaavasta 60, jossa käytetään koko poikkileikkauksen paksuutta t_{gross} . (Flaig, M., 2014, kohta 3.2.2.)

$$\tau_{xz,gross,h} = \frac{1,5 \cdot F_{max}}{(h - h_h) \cdot t_{gross}}$$

jossa kaava 60.
 $\tau_{xz,gross,h}$ bruttopoikkileikkauksen leikkausjännitys
 t_{gross} palkin bruttopoikkileikkauksen leveys

Toisessa tarkastelussa nettopoikkileikkauksen leikkausjännityksen selvittämiseen tarvitaan k_{h2} -kerroin, joka saadaan kaavasta 61 (Flaig, M., 2014, kohta 2.2). Nettopoikkileikkauksen leikkausjännityksessä $\tau_{xz,net,h}$ (kaava 62) käytetään lamellien nettopaksuutena pitkittäisten tai poikittaisten lamellien pienempää yhteenlaskettua paksuutta t_{net} (Flaig, M., 2014, kohta 3.2.2).

$$k_{h2} = 0,103 \cdot \left(\frac{h_h \cdot l_h}{h^2} \cdot m^2 \right) + 1,27$$

jossa kaava 61.
 k_{h2} kerroin
 l_h reiän leveys
 m pitkittäislamellien pystysuuntainen määrä

$$\tau_{xz,net,h} = k_{h2} \cdot \frac{1,5 \cdot F_{max}}{h \cdot t_{net}}$$

jossa kaava 62.
 $\tau_{xz,net,h}$ netto poikkileikkauksen leikkausjännitys
 t_{net} pienempi lamellien yhteen laskettu paksuus

Viimeisessä tarkastelussa käydään läpi risteysalueiden leikkausjännityksiä. Vääntöleikkausjännitys $\tau_{tor,h}$ lasketaan kaavalla 64, johon tarvitaan k_{h1} -kerrointa (kaava 63). Palkin leveys b ja rakenteen lamellien risteysalueiden lukumäärä n_{CA} vaikuttavat myös vääntöleikkausjännitykseen. Risteysalueella tulee tarkastaa vielä palkin suuntainen leikkausjännitys $\tau_{yx,h}$ sekä palkkia kohtisuoraan oleva leikkausjännitys $\tau_{yz,h}$, jotka saadaan kaavoista 65 ja 66. (Flaig, M., 2014, kohta 2.2, 3.2.2.)

$$k_{h1} = 1,81 \cdot \left(\frac{l_h}{h} \cdot \frac{h_h}{h - h_h} \right) + 1,14$$

jossa kaava 63.
 k_{h1} kerroin

$$\tau_{tor,h} = k_{h1} \cdot \frac{3 \cdot F_{max}}{b^2 \cdot n_{CA}} \cdot \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m^3} \right)$$

jossa kaava 64.
 $\tau_{tor,h}$ vääntöleikkausjännitys
 b palkin leveys
 n_{CA} risteysalueiden lukumäärä

$$\tau_{yx,h} = k_{h2} \cdot \frac{6 \cdot F_{max}}{b^2 \cdot n_{CA}} \cdot \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{m^3} \right)$$

jossa kaava 65.
 $\tau_{yx,h}$ palkin suuntainen leikkausjännitys

$$\tau_{yz,h} = \frac{F_{t,90}}{n_{CA} \cdot a_r \cdot h_r}$$

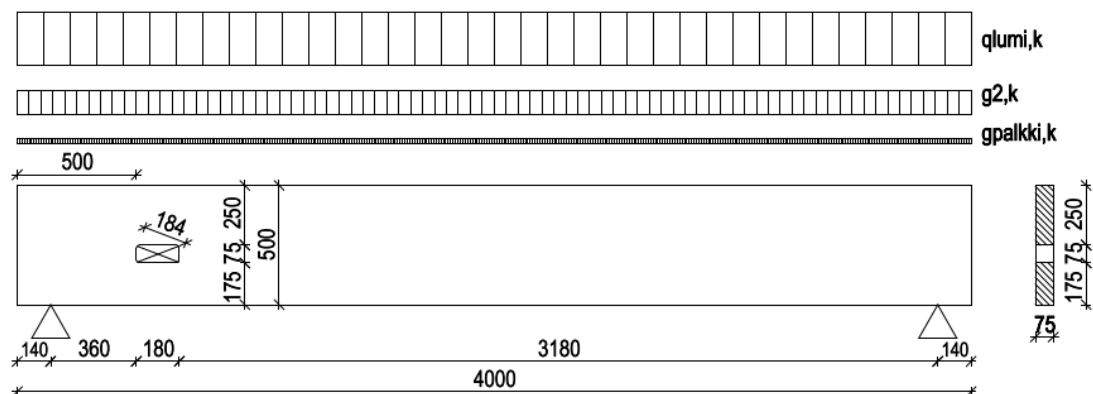
jossa kaava 66.
 $\tau_{yz,h}$ palkin kohtisuoran leikkausjännitys

Tutkimuksessa ei päästy yksiselitteiseen mitoitusehtoon, johon edellä mainittuja jännityksiä voitaisiin verrata. Selkeitä ominaisarvoja ei myöskään tutkimuksessa selvinnyt.

CLT pystyy ottamaan rakenteensa ansiosta myös poikittaista vetoa hyvin vastaan, jonka vuoksi sitä ei erikseen vahvisteta muilla menetelmillä (Flaig, M., 2014, kohta 1).

6 SOVELLUSLASKELMA

Tässä esimerkkilaskussa on LVL-palkki Kerto-S 75x500, joka sijaitsee Espoossa. Rakenne on kuvan 22 mukainen, jonka palkkijako on 7 metriä. Palkki on lämpimissä sisätiloissa, jolloin käyttöluokka on 1. Kuormien aikaluokka on lumikuorman takia keskipitkä. Lumikuormaa rakenteelle tulee $2,2 \text{ kN/m}^2$ ja palkin omapainon lisäksi rakenteelle tulee 1 kN/m^2 pysyvää kuormaa. Näiden kuormien perusteella reiän mitoitettavaksi taivutusmomentiksi tulee $M_d=31,56 \text{ kNm}$ ja mitoittavaksi leikkausvoimaksi $V_d=47,05 \text{ kN}$. Normaalivoimaa rakenteella ei ole. Mitoittava taivutusmomentti on otettu reiän keskeltä ja leikkausvoima puolestaan reiän vasemmasta reunasta. Laskussa käsitellään Metsä Woodin valmistamaa Kerto-S palkkia, joten käytetään materiaalin ominaisarvoina juuri kyseisen tuotteen tuotesertifikaatin mukaisia arvoja. Nämä arvot ovat määritelty kuvassa 23. Esimerkkilaskua verrataan Metsä Woodin Finnwood -mitoitushjelmalla tehtyyn laskemaan, johon on valittu samankokoinen Kerto-S palkki. Tällöin tulokset ovat vertailukelpoisia.



Kuva 22. Esimerkin mukainen rakenne.

Tyyppi		Kerto-S Paksuus 21–90 mm	Kerto-T Paksuus 27–75 mm	Kerto-Q Paksuus 21–24 mm	Kerto-Q Paksuus 27–69 mm
Ominaislujuudet (N/mm ²)					
Taivutus					
- syrjällään	$f_{m,k}$	44	27	28	32
- kokovaikutusekspONENTTI	s	0,12	0,15	0,12	0,12
- lappeellaan	$f_{m,0,flat,k}$	50	32	32	36
Veto					
- syysuuntaan	$f_{t,0,k}$	35	24	19	26
- poikittain syrjällään	$f_{t,90,edge,k}$	0,8	0,5	6,0	6,0
Puristus					
- syysuuntaan	$f_{c,0,k}$	35	26	19	26
- poikittain syrjällään	$f_{c,90,edge,k}$	6	4	9	9
- poikittain lappeellaan	$f_{c,90,flat,k}$	1,8	1,0	2,2	2,2
Leikkaus					
- syrjällään	$f_{v,k}$	4,1	2,4	4,5	4,5
- lappeellaan pintaviilun suuntaan	$f_{r,0,k}$	2,3	1,3	1,3	1,3
Jäykkyysominaisuudet (N/mm ²)					
Kimmoduuli	E_{mean}	13 800	10 000	10 000	10 500
	$E_{0,05}$	11 600	8 800	8 300	8 800
Liukumoduuli	$G_{edge,mean}$	600	400	600	600
	$G_{edge,0.05}$	400	300	400	400
Ominaisstiheys (kg/m ³)	ρ_k	480	410	480	480
Tiheyden keskiarvo (kg/m ³)	ρ_{mean}	510	440	510	510

Kuva 23. Kertopuun ominaisarvoja (RIL 205-1-2017, 2017, s. 55).

Materiaalitiedot:

$$f_{t,90,k} = 0,8 \text{ MPa}$$

$$f_{v,k} = 4,2 \text{ MPa}$$

$$f_{c,0,k} = 35 \text{ MPa}$$

$$f_{t,0,k} = 35 \text{ MPa}$$

$$f_{m,k} = 44 \text{ MPa}$$

$$s = 0,12$$

Poikittainen veto

Leikkaus

Syysuuntainen puristus

Syysuuntainen veto

Taivutus

kokovaikutusekspONENTTI

Ehtojen tarkastelu:

$$d = 184 \text{ mm}$$

$$d \geq 50 \text{ mm}$$

ok!

Koska reiän halkaisija on yli 50 mm, pitää alla olevat ehdot täytyä.

$l_v = 500 \text{ mm}$	$l_v \geq h$	ok!
$l_z = \text{ei ole}$	$l_z \geq 1,5 \cdot h$	ok!
	kuitenkin $l_z \geq 300 \text{ mm}$	ok!
$l_A = 360 \text{ mm}$	$l_A \geq h/2$	ok!
$h_{ro} = 250 \text{ mm}$	$h_{ro} \geq 0,35 \cdot h$	ok!
$h_{ru} = 175 \text{ mm}$	$h_{ru} \geq 0,35 \cdot h$	ok!
$a = 180 \text{ mm}$	$a \leq 0,4 \cdot h$	ok!
$h_d = 75 \text{ mm}$	$h_d < 0,15 \cdot h$	ok!
$r = 15 \text{ mm}$	$r \geq 15 \text{ mm}$	ok!

Muut lähtötiedot:

$h = 500 \text{ mm}$	Palkin korkeus
$b = 75 \text{ mm}$	Palkin leveys
$k_{mod} = 0,8$	Kerroin
$\gamma_M = 1,2$	Materiaalin osavarmuuskerroin
$V_d = 47,05 \text{ kN}$	Leikkausvoima
$M_d = 31,56 \text{ kNm}$	Taivutusmomentti

Koska edellä mainitut ehdot täyttyivät, voidaan laskentaa jatkaa eteenpäin. Aloitetaan tarkastelu poikittaisesta vetokestävydestä.

$$f_{t,90,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{t,90,k}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot \frac{0,8 \text{ MPa}}{1,2} = 0,533 \text{ MPa}$$

$$k_{t,90} = \min \left\{ \left(\frac{450}{h} \right)^{0,5} = \min \left\{ \left(\frac{450}{500} \right)^{0,5} = 0,949 \right. \right.$$

$$l_{t,90} = 0,5 \cdot (h_d + h) = 0,5 \cdot (75 \text{ mm} + 500 \text{ mm}) = 287,5 \text{ mm}$$

$$h_r = \min(h_{ro}; h_{ru}) = \min(250 \text{ mm}; 175 \text{ mm}) = 175 \text{ mm}$$

$$F_{t,v,d} = \frac{V_d \cdot h_d}{4 \cdot h} \cdot \left(3 - \frac{h_d^2}{h^2} \right) = \frac{47,05 \text{ kN} \cdot 75 \text{ mm}}{4 \cdot 500 \text{ mm}} \cdot \left(3 - \frac{(75 \text{ mm})^2}{(500 \text{ mm})^2} \right) = 5,253 \text{ kN}$$

$$F_{t,m,d} = 0,008 \cdot \frac{M_d}{h_r} = 0,008 \cdot \frac{31,56 \text{ kNm}}{175 \text{ mm}} = 1,443 \text{ kN}$$

$$F_{t,90,d} = F_{t,v,d} + F_{t,m,d} = 5,243 \text{ kN} + 1,463 \text{ kN} = 6,696 \text{ kN}$$

$$\sigma_{t,90,d} = \frac{F_{t,90,d}}{0,5 \cdot b \cdot k_{t,90} \cdot l_{t,90}} = \frac{6,696 \text{ kN}}{0,5 \cdot 75 \text{ mm} \cdot 0,949 \cdot 287,5 \text{ mm}} = 0,655 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_{t,90,d}}{f_{t,90,d}} \cdot 100 \% = \frac{0,655 \text{ MPa}}{0,533 \text{ MPa}} \cdot 100 \% = 122,8\%$$

Poikittaisen vedon käyttöaste menee yli 100 %, joka tarkoittaa, että palkki ei kestä reiän kohdalla siihen aiheutuvaa poikittaista vetojännitystä. Tämän johdosta palkkia pitää vahvistaa reiän reunoilta poikittaista vetoa vastaan. Käytetään tässä esimerkissä ruuvivahvistamista täyskierteisillä SPAX 8x400 ruuveilla. Kokeillaan yhtä ruuvia molemmiin puolin reikää.

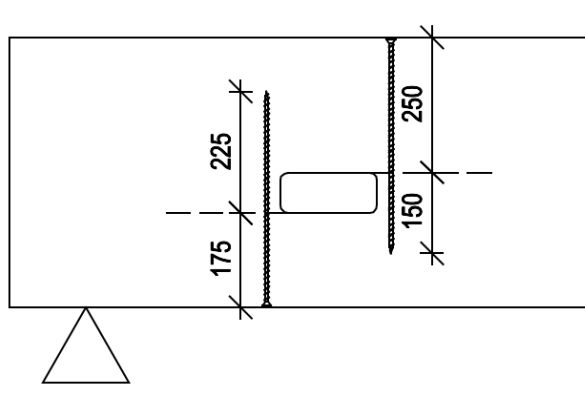
Vahvistusehtojen tarkastelu:

$l_v = 500 \text{ mm}$	$l_v \geq h$	<i>ok!</i>
$l_z = \text{ei ole}$	$l_z \geq h$,	<i>ok!</i>
	<i>kuitenkin $l_z \geq 300 \text{ mm}$</i>	<i>ok!</i>
$l_A = 360 \text{ mm}$	$l_A \geq h/2$	<i>ok!</i>
$h_{ro} = 250 \text{ mm}$	$h_{ro} \geq 0,25 \cdot h$	<i>ok!</i>
$h_{ru} = 175 \text{ mm}$	$h_{ru} \geq 0,25 \cdot h$	<i>ok!</i>
$a = 180 \text{ mm}$	$a \leq h$	<i>ok!</i>
$a / h_d = 2,4$	$a / h_d \leq 2,5$	<i>ok!</i>
$h_d = 75 \text{ mm}$	$h_d < 0,3 \cdot h$	<i>ok!</i>

Lähtötiedot:

$\rho_k = 480 \text{ kg/m}^3$	<i>Puun ominaistiheys</i>
$\gamma_M = 1,3$	<i>Liitoksen osavarmuuskerroin</i>
$n = 1$	<i>Ruuvien lukumäärä rivissä</i>
$f_{ax,k} = 12 \text{ MPa}$	<i>Ruuvien ulosvetolujuus</i>
$f_{tens,k} = 17 \text{ MPa}$	<i>Ruuvien vetolujuus</i>
$d = 8 \text{ mm}$	<i>Ruuvien halkaisija</i>
$l = 400 \text{ mm}$	<i>Ruuvien pituus</i>

Tarkastellaan aluksi liitoksen läpivetokestävyyttä. Ruuvien tehollisena tunkeumasyvyytenä l_{ef} käytetään kuvan 24 lyhyintä tunkeumasyvyyttä.



Kuva 24. Ruuvien tunkeumasyvyydet.

$$n_{ef} = \max \left\{ \begin{array}{l} n^{0,9} \\ 0,9 \cdot n \end{array} \right. = \max \left\{ \begin{array}{l} 1^{0,9} \\ 0,9 \cdot 1 \end{array} \right. = 1$$

$$l_{ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} h_{ru} \\ h_{ro} \\ l - h_{ru} \\ l - h_{ro} \end{array} \right. = \min \left\{ \begin{array}{l} 175 \text{ mm} \\ 250 \text{ mm} \\ 400 \text{ mm} - 175 \text{ mm} \\ 400 \text{ mm} - 250 \text{ mm} \end{array} \right. = 150 \text{ mm}$$

$$F_{ax,Rk} = n_{ef} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot \left(\frac{\rho_k}{350} \right)^{0,8} = 1 \cdot 12 \text{ MPa} \cdot 8 \text{ mm} \cdot 150 \text{ mm} \cdot \left(\frac{480}{350} \right)^{0,8} \\ = 18,54 \text{ kN}$$

$$F_{ax,Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{ax,Rk}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot \frac{18,54 \text{ kN}}{1,3} = 11,4 \text{ kN}$$

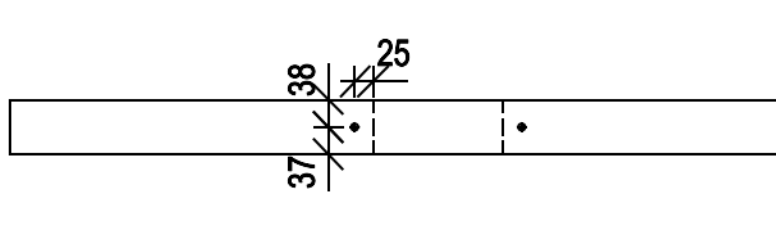
$$\frac{F_{t,90,d}}{F_{ax,Rd}} \cdot 100 \% = \frac{6,696 \text{ kN}}{11,4 \text{ kN}} \cdot 100 \% = 58,7 \%$$

Liitoksen läpivetokestävyyden käyttöaste jää alle 100 %, joten liitos kestää tältä osin poikittaisen vedon. Tarkastetaan vielä ruuvien vetokestävyys.

$$F_{tens,d} = n_{ef} \cdot \frac{f_{tens,k}}{\gamma_M} = 1 \cdot \frac{17 \text{ MPa}}{1,3} = 13,1 \text{ kN}$$

$$\frac{F_{t,90,d}}{F_{tens,d}} \cdot 100 \% = \frac{6,696 \text{ kN}}{13,1 \text{ kN}} \cdot 100 \% = 51,2 \%$$

Ruuvien vetokestävyys käyttöaste jää myös alle 100 %, joten reikä voidaan vahvistaa SPAX 8x400 ruuveilla. Yhdet ruuvit asetetaan reiän molemmin puolin kuvan 25 mukaan, jolloin ruuvit täyttävät tarvittavat reunaetäisyydet.



Kuva 25. Vahvistusruuviin asettelu.

Tarkastetaan seuraavaksi reiän leikkauskestävyys.

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot \frac{4,2 \text{ MPa}}{1,2} = 2,8 \text{ MPa}$$

$$b_{eff} = k_{cr} \cdot b = 1 \cdot 75 \text{ mm} = 75 \text{ mm}$$

$$h_{eff} = h_{ro} + h_{ru} = 250 \text{ mm} + 175 \text{ mm} = 425 \text{ mm}$$

$$A_{eff} = h_{eff} \cdot b_{eff} = 425 \text{ mm} \cdot 75 \text{ mm} = 31875 \text{ mm}^2$$

$$\tau_d = \frac{3 \cdot V_d}{2 \cdot A_{eff}} = \frac{3 \cdot 47,05 \text{ kN}}{2 \cdot 31875 \text{ mm}^2} = 2,214 \text{ MPa}$$

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} \cdot 100 \% = \frac{2,214 \text{ MPa}}{2,8 \text{ MPa}} \cdot 100 \% = 79,1 \%$$

Leikkauskestävyyden käyttöaste jää alle 100 %, joten palkki kestää leikkausjännitykset reiän kohdalla. Koska palkissa ei ole normaalivoimia, voidaan puristus- ja vetojännitys tarkastelut jättää huomioimatta. Tämän vuoksi myöskään yhdistettyjä jännityksiä ei tarvitse laskea. Tarkistetaan vielä lopuksi taivutuskestävyys reiän kohdalla.

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{300 \text{ mm}}{h} \right)^s = \min \left\{ \left(\frac{300 \text{ mm}}{500 \text{ mm}} \right)^{0,12} = 0,941 \right.$$

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot \frac{k_h \cdot f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,8 \cdot \frac{0,941 \cdot 44}{1,2} = 27,589 \text{ MPa}$$

Kuvassa 26 on esitetty poikkileikkauksen osapintojen mittoja. Kuvan vasemmalla puolella on esitetty osapinnat, joiden avulla voidaan selvittää rakenteen painopisteen sijainti. Oikealla puolella puolestaan on esitetty osapintojen pinta-alat sekä etäisyydet

painopisteeseen. Näitä tietoja tarvitaan poikkileikkauksen tehollisen neliömomentin laskentaan, jonka avulla saadaan palkin ylä- ja alareunan taivutusjännitykset selville.

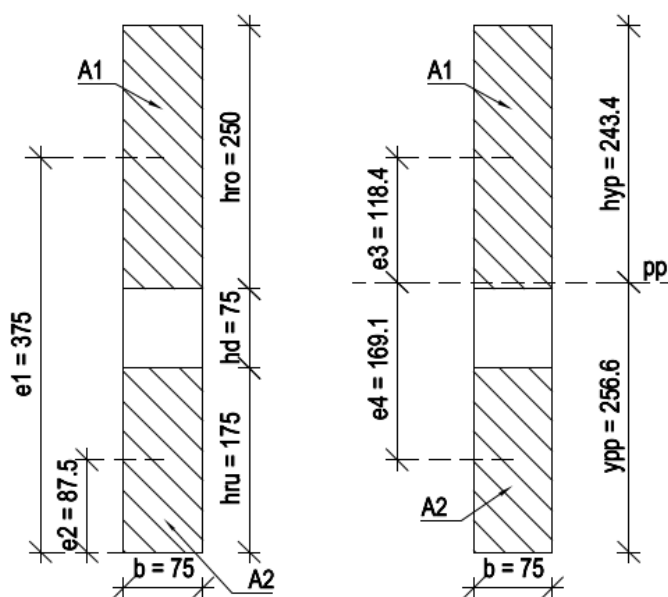
$$A_1 = b \cdot h_{ro} = 75 \text{ mm} \cdot 250 \text{ mm} = 18750 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = b \cdot h_{ru} = 75 \text{ mm} \cdot 175 \text{ mm} = 13125 \text{ mm}^2$$

$$e_1 = 375 \text{ mm}$$

$$e_2 = 87,5 \text{ mm}$$

$$y_{pp} = \frac{A_1 \cdot e_1 + A_2 \cdot e_2}{A_1 + A_2} = \frac{18750 \text{ mm}^2 \cdot 375 \text{ mm} + 13125 \text{ mm}^2 \cdot 87,5 \text{ mm}}{18750 \text{ mm}^2 + 13125 \text{ mm}^2} = 256,6 \text{ mm}$$



Kuva 26. Osapintojen mittoja.

$$A_1 = 18750 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = 13125 \text{ mm}^2$$

$$e_3 = 118,4 \text{ mm}$$

$$e_4 = 169,1 \text{ mm}$$

$$I_1 = \frac{b \cdot h_{ro}^3}{12} = \frac{75 \text{ mm} \cdot (250 \text{ mm})^3}{12} = 976,6 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_2 = \frac{b \cdot h_{ru}^3}{12} = \frac{75 \text{ mm} \cdot (175 \text{ mm})^3}{12} = 335,0 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_{eff} = I_1 + A_1 \cdot e_3^2 + I_2 + A_2 \cdot e_4^2 = 976,6 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 + 18750 \text{ mm}^2 \cdot (118,4 \text{ mm})^2 + 335,0 \cdot 10^5 \text{ mm}^4 + 13125 \text{ mm}^2 \cdot (169,1 \text{ mm})^2 = 769,3 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_a = M_d \cdot \frac{y_{pp}}{I_{eff}} = 31,56 \text{ kNm} \cdot \frac{256,6 \text{ mm}}{769,3 \cdot 10^6 \text{ mm}^4} = 10,527 \text{ MPa}$$

$$\sigma_y = M_d \cdot \frac{h - y_{pp}}{I_{eff}} = 31,56 \text{ kNm} \cdot \frac{500 \text{ mm} - 256,6 \text{ mm}}{I_{eff}} = 9,984 \text{ MPa}$$

$$\frac{\max(\sigma_x, \sigma_y)}{f_{m,d}} \cdot 100 \% = \frac{10,527 \text{ MPa}}{27,589 \text{ MPa}} \cdot 100 \% = 38,158 \%$$

Taivutusjännitys on suurempi palkin alareunassa, joten se tulee määrääväksi. Käyttöaste taivutuksen osalta jää myös alle 100 %, joten palkki kestää reiän kohdalta siihen aiheutuvan taivutuksen.

7 TUTKIMUSTULOSTEN ANALYSOINTI JA POHDINTA

Laskun esimerkkitapaus on tutkittu myös Finnwood -mitoitushjelmalla, jonka tulokset ovat näkyvissä taulukossa 6 yllä olevien laskentatulosten kanssa. Finnwood -ohjelman tarkemmat laskentatulokset löytyvät liitteestä 1.

Taulukko 6. Tulosten vertailu käsilaskennan ja mitoitushjelman välillä

	Käsilaskenta		Finnwood-tarkastelu	
	Jännitys	Käyttöaste	Jännitys	Käyttöaste
Poikittainen vetokestävyys	0,65 MPa	123 %	0,60 MPa	140 %
Leikkauskestävyys	2,21 MPa	79 %		79 %
Taivutuskestävyys	10,53 MPa	38 %		54 %

Kuten taulukosta 6 nähdään, Finnwood -mitoitushjelma antaa erilaiset tulokset poikittaisen vedon ja taivutuksen osalta. Leikkauskestävyyden käyttöasteeksi saatiin molemmista mitoitustavoista noin 79 %. Näin ollen voidaan päätellä, että molemmat mitoitustavat laskevat leikkauskestävyyden samalla tavalla. Poikittaisen vetojännityksen arvo eroaa hieman toisistaan. Työssä käydyn laskentatavan mukaan poikittaiseksi vetojännitykseksi saatiin 0,655 MPa ja mitoitushjelmasta saatiin 0,60 MPa. Vaikka käsin laskennassa saatiin suurempi jännitys, on lopullinen käyttöaste kuitenkin suurempi ohjelmalla laskettaessa. Taivutuksen osalta käyttöaste jää myös käsin laskemalla pienemmäksi kuin ohjelmalla laskettaessa. Näin ollen voidaan todeta, että Finnwood -mitoitushjelmalla laskettaessa tulokset ovat varmemmalla puolella, kuin työssä

käydyn laskentatavan mukaan laskemalla. Tämä voidaan todeta kuitenkin vain Kerto LVL:n osalta. Finnwood -mitoitushjelma antaa pelkät tulokset reiän kohdalle aiheutuvista voimista ja jännityksestä sekä niiden käyttöasteet. Näin ollen ohjelman laskentamenetelmää ei pystytä vertailemaan työssä käytyyn menetelmään. Tuloksista voidaan vain päätellä, että ohjelma käyttää todennäköisesti jotain muuta laskenta menetelmää. Kuten aiemmin todettiin, voidaan Metsä Woodin Kerto LVL:n osalta mitoitusta suorittaa myös VTT:n sertifikaatin nro 184/03 mukaan. Mitoitushjelma voi mahdollisesti käyttää tätä mitoitustapaa, mutta siitä ei voida olla täysin varmoja. Mikäli haluttaisiin saada tarkemmin selville, kuinka ohjelma mitoittaa reiän, täytyisi siitä tehdä laajempia tutkimuksia reiän mitoittamisesta juuri Kerto LVL-palkilla. Finnwood -mitoitushjelmalla ei pystytä tarkastamaan muiden materiaalien reikä mitoitusta, joten vertailu on voitu suorittaa vain Kerto LVL-palkin osalta.

Tutkimuksen perusteella liimapuu mitoitetaan samalla tavalla kuin LVL:kin, työssä käydyn menetelmän mukaan vertailemalla saatuja jännityksiä materiaalin mitoitusarvoihin. Reiän koko ja sijainti täytyy myös tarkistaa poikittaiseen vetoon liittyvistä ehdoista. Sahatavara poikkeaa liimapuun ja LVL:n mitoituksesta siten, että siinä ei tarkasteta poikittaista vetoa reiän kohdalla. Tämän vuoksi reikä saa olla vain pyöreä ja halkaisijaltaan enintään 30 mm. Poikittaista vetoa ei tarvitse tarkistaa myöskään liimapuulla ja LVL:llä, mikäli edellä mainittu ehto täytyy reiän osalta. Tällöin myös reiän sijaintiin vaikuttavat ehdot ovat erilaiset kuin isommilla rei'illä, joita liimapuuhun ja LVL:ään saa tehdä.

Reiän vahvistaminen tapahtuu poikittaista vetoa vastaan, joka voidaan toteuttaa erilaisin menetelmin. Tutkimuksessa kävi ilmi, että on olemassa sekä sisäisiä, että ulkoisia vahvistamistapoja. Sisäisiin vahvistamistapoihin kuuluvat ruuvivahvistaminen sekä liimatangolla vahvistaminen. Ulkoisiin vahvistamisiin puolestaan kuuluu levyvahvistaminen, joka on työssä tarkasteltu vanerilla.

CLT-rakenteet mitoitetaan valmistajien ohjeiden mukaan, joista ei löytynyt mitoitushjeita palkeille. Tämän vuoksi aiheen tutkimista laajennettiin rei'itetyistä CLT-palkeista tehtyihin tutkimuksiin. Saksassa oli tehty tällainen tutkimus, jonka tarkoituksena oli selkeyttää reiän mitoitusta CLT-palkissa. Tutkimuksesta kävi ilmi, kuinka erilaisia sisäisiä jännityksiä voidaan tarkastella eri kohdissa rakennetta. Mitoitusehtoja ei

saatu tutkimuksesta kuitenkin selkeästi selville. CLT-palkkeja ei ole vielä tutkittu riittävästi, jotta niille olisi saatu selkeitä mitoitusohjeita. Joten tutkimista pitäisi jatkaa, jotta saataisiin enemmän tietoa palkin rakenteellisesta toiminnasta reiän kohdalla. Näin voitaisiin vertailla CLT-palkin kannattavuutta verrattuna muihin materiaaleihin. CLT-palkin etuna on rakenteelle ominaiset ristikkäiset lamellit, jotka pystyvät ottamaan vastaan poikittaisen vedon, joilla rakennetta ei erikseen tarvitse vahvistaa.

Tutkimuksessa on käytetty Suomessa hyväksytyjä ajankohtaisia mitoitusmenetelmiä, jonka vuoksi tutkimustuloksia voidaan pitää luotettavina. Sovelluslaskennan ja Finnwood -mitoitusohjelman tulosten ero ei tarkoita, etteikö tutkimuksen tulokset olisi luotettavia Kerto LVL:n osalta, koska se voidaan mitoittaa erilaisin menetelmin, kuten tutkimuksessa on käynyt aiemmin ilmi. Ruuvivahvistamisessa käytettävää lähdettä voidaan pitää luotettavana, koska sillä on eurooppalainen tekninen arviointi (ETA). Liimatanko- ja levyvahvistuksen osalta on käytetty lähteenä kirjaan, jonka reiän vahvistaminen perustuu Eurokoodi 5 Saksan kansalliseen liitteeseen. Tutkimuksessa ei päästy käsiksi suoraan Saksan kansalliseen liitteeseen, jonka vuoksi työssä on käytetty toissijaista lähdettä tältä osin. Kirjassa käytetty lähde on kuitenkin todettu perustuvan ajankohtaisimpaan Saksan kansalliseen liitteeseen. Tästä syystä kyseistä kirjalähdettä voidaan pitää todennäköisesti luotettavana. Luotettavuutta olisi voitu parantaa, mikäli käytössä olisi ollut varsinainen Saksan kansallinen liite. CLT-palkin reiän mitoitusseen perustuvassa tutkimuksessa on testattu useampaa CLT-palkkia, joissa on reikiä. Joten tutkimusta voidaan pitää jossain määrin luotettavana. Tällaisia tutkimuksia ja testauksia pitäisi kuitenkin olla paljon enemmän, jotta niiden tuloksia voitaisiin verrata toisiinsa ja näin ollen saada luotettavampaa tulosta CLT-palkin käyttäytymisestä ja sen mitoittamisesta reiän kohdalla.

8 YHTEENVETO

Tutkimuksen tavoitteina oli selvittää eri materiaaleista tehtyjen puupalkkien reikien mitoittaminen. Tuloksena saatiin selville, että liimapuun ja LVL:n mitoitusmenetelmät voidaan toteuttaa samalla tavalla. Aina aluksi pitää tarkistaa tapauskohtaiset

mitoitusehdot, jonka jälkeen voidaan lähteä mitoittamaan reikää, mikäli ehdot täyttyvät. Menetelmissä mitoitetaan poikittainen veto-, leikkaus-, veto- ja puristus- sekä taivutus kestävyudet. Sahatavaraan saa tehdä vain pyöreitä reikiä, joiden halkaisija on suurimmillaan 30 mm. Tällöin poikittaista vetoa ei tarkastella. Tämä pätee myös liimapuuhun ja LVL-palkkiin. CLT-palkin reiän mitoituksen osalta selvisi, ettei tähän ole mitoitusohjeita. Tästä syystä tätä lähdettiin tutkimaan toisen tutkimuksen pohjalta, jonka tavoitteena oli yksinkertaistaa CLT-palkin reiän suunnittelua. Tältä osin tutkimusongelmaan ei saatu vastausta.

Reiän vahvistamisen tarkastelua lähdettiin selvittämään, kuinka reikää voidaan vahvistaa erilaisin menetelmin. Tutkimuksessa selvisi, että on kahta erilaista vahvistamistapaa, sisäinen ja ulkoinen vahvistaminen. Työssä käsiteltiin tarkemmin kolmea erilaista vahvistamista. Aluksi tutkittiin kahta sisäistä vahvistustapaa, jotka ovat ruuvi- vahvistaminen SPAX:n täysikierteisillä ruuveilla sekä liimatangolla vahvistaminen. Kolmantena vahvistamistapana valikoitui levyvahvistaminen vanerilla. CLT-materiaalia ei vahvisteta sen ominaisen rakenteensa vuoksi.

Tutkimustuloksia sovellettiin esimerkkilaskun muodossa, joka käsitteli Kerto LVL-palkkiin tehtävää reikää. Tämä materiaali valikoitui, koska tällöin tätä esimerkkilaskua pystyttiin vertailemaan Metsä Woodin Finnwood -mitoitushjelmalla tehtävään laskuun. Vertailussa kävi ilmi, että poikittaisen vedon sekä taivutuksen käyttöasteissa oli eroja. Varmaa selvyyttä siitä, mistä nämä erot johtuivat, ei saatu selville.

Reikien mitoittamista on tarkastelu puurakenteiden opintojaksolla, jonka vuoksi aihe ei ollut täysin tuntematon. Aiheeseen ei kuitenkaan perehdytty kovin syvällisesti, jonka seurauksena tätä tutkimusta tehdessä tietämys aiheesta on lisääntynyt merkittävästi. Puurakenteiden mitoituksessa ominaisesti käytetyt lujuusopin kaavat ovat olleet entuudestaan tuttuja, koska niitä on käsitelty useammallakin opintojaksoilla sekä työelämässä. Vahvistaminen tuli lähes täysin uutena ja erityisesti liimatangon ja levyvahvistamisen osalta. CLT-palkin osalta kaikki oli uutta ja mielenkiinto tätä materiaalia kohtaan lisääntyi. Myös itse tutkimuksen tekeminen oli entuudestaan melko tuntematon ja tutkimuksen edetessä tästäkin opittiin koko ajan uutta. Tämän tutkimuksen tekemisestä on varmasti hyötyä myös tulevaisuudessa työelämässä sekä mahdollisissa jatko-opinnoissa.

LÄHTEET

Blaß, H. J. & Sandhaas, C. (2017). Timber Engineering: Principles for Design. Karlsruhe Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/KSP/1000069616>

Borgström, E. & Fröbel J. (2019). The CLT Handbook: CLT structures – facts and planning. Swedish Wood. <https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdf/clt-handbook-2019-eng-m-svensk-standard-2019.pdf>

ETA-12/0114. (2020) SPAX self-tapping screws. <https://downloads.spax.com/?op>

Flaig, M. (2014). Design of CLT Beams with Rectangular Holes or Notches. https://www.researchgate.net/publication/346942544_Design_of_CLT_Beams_with_Rectangular_Holes_or_Notches

Jelec, M., Rajcic, V., Danielsson, H. & Serrano E. (2016). Structural analysis of in-plane loaded CLT beam with holes: FE-analyses and parameter studies. <https://portal.research.lu.se/en/publications/structural-analysis-of-in-plane-loaded-clt-beam-with-holes-fe-ana>

Metsä Wood. (2021). Finnwood (versio 2.4.3) [tietokoneohjelma]. <https://www.metsagroup.com/fi/metsawood/tuotteet-ja-palvelut/digitaaliset-tyokalut/finnwood/>

Opinkirjo kehittämiskeskus. (n.d.). Tieteellinen tutkimus ja tutkimusstrategiat. Haettu 3.12.2022 osoitteesta <https://opinkirjo.fi/tutkimuksen-perusteet/tutkimusprosessi/>

Puuinfo. (2019a). Puutavaraopas. https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/Puutavaraopas_2019_netti.pdf

Puuinfo. (2019b). Esimerkki 10 Palkin vahvistamaton reikä. <https://puuinfo.fi/koulu-tus/vaativien-puurakenteiden-suunnittelu-taydennyskoulutus-vaapu/vaapu-esimerkkilaskelmat/>

Puuinfo. (2020). Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje (5. painos). Puuinfo. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Eurokoodi-5-Lyhennetty-suunnitteluohje-5.-PAINOS-2020-P%C3%84IVITYS-22.7.-web.pdf>

Puuteollisuus. (2020). LVL Handbook: Europe (2. painos). Puuteollisuus. https://proofer.faktor.fi/epaper/LVLHandbook_2020/

RIL 205-1-2017. (2017). Puurakenteiden suunnitteluohje. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL

Varis, R. (2017). Sahateollisuus. Kirjakaari.

SFS EN 14080:2013. (2013). Puurakenteet. Liimapuu ja liimattu sahatavara. Vaatimukset. Suomen Standardisoimisliitto. <https://online.sfs.fi/>

SFS EN 1995-1-1. (2014). Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1–1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Suomen Standardisoimisliitto. <https://online.sfs.fi/>

SPAX Pacific. (2020). Timber Construction Application Sheet No. 2. <https://downloads.spax.com/?op>

Suomen Liimapuuyhdistys & Puuinfo. (2014). Liimapuukäsikirja osa 1. Suomen Liimapuuyhdistys & Puuinfo. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Liimapuuk%C3%A4sikirja-Osa-1.pdf>

Suomen Liimapuuyhdistys & Puuinfo. (2015a). Liimapuukäsikirja osa 2. Suomen Liimapuuyhdistys & Puuinfo. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Liimapuuk%C3%A4sikirja-Osa-2.pdf>

Suomen Liimapuuyhdistys & Puuinfo. (2015b). Liimapuukäsikirja osa 3. Suomen Liimapuuyhdistys & Puuinfo. <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/Liimapuuk%C3%A4sikirja-Osa-3.pdf>

Vuori J. (n.d.). Tapaustutkimus. Tietoarkisto. Haettu 3.12.2022 osoitteesta <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/tutkimusasetelma/tapaustutkimus/>

Ympäristöministeriö. (n.d.). Puurakentamisen toimenpideohjelma. Haettu 4.12.2022 osoitteesta <https://ym.fi/hankesivu?tunnus=YM025:00/2018>

Ympäristöministeriö. (2016). Rakenteiden lujuus ja vakaus: Ympäristöministeriön ohje puurakenteista. https://ym.fi/documents/1410903/38439968/lopullinen-puurakenteet-F48BD8DA_D384_481B_BC09_FE51691B8BE8-123939.pdf/7b5d70f7-f18f-66fe-8da1-d467e39c5ffe/lopullinen-puurakenteet-F48BD8DA_D384_481B_BC09_FE51691B8BE8-123939.pdf?t=1603260650690

Finwood 2.4.3 (2.4.088)

© Copyright 2019 Metsäliitto Osuuskunta, Metsä Wood

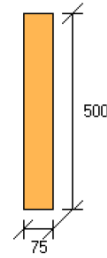
MAKSIMIKÄYTTÖASTE YLITTYI

4.12.2022

Laskelmat on tehty alla olevilla lähtötiedoilla vain kyseiselle rakenneosalle. Laskelmissa esitetty rakenneosan pituus ei ole tilausmitta. Tilausmitassa on otettava huomioon esim. tuennan vaatima lisäpituus.

RAKENNETIEDOT:

Rakennetyyppi: Vapaa rakenne
 Materiaali: KERTO-S syrjällään
 Poikkileikkaus: 75x500
 Lisätietoja: Vakiokoko
 (B=75 mm, H=500 mm, A=37500 mm², I_y=781250000 mm⁴, W_y=3125000 mm³)
 Käyttöluokka: 1
 Seuraamusluokka: CC2 (KFI=1.0)
 Jako/kuormituslev.: 7000 mm (pintakuormille)

**Uloke-/jännevälipituudet:**

Uloke/jänneväli: Vaakamitta [mm]:
 Jänneväli 1: 4000.0
 Yhteensä: 4000.0

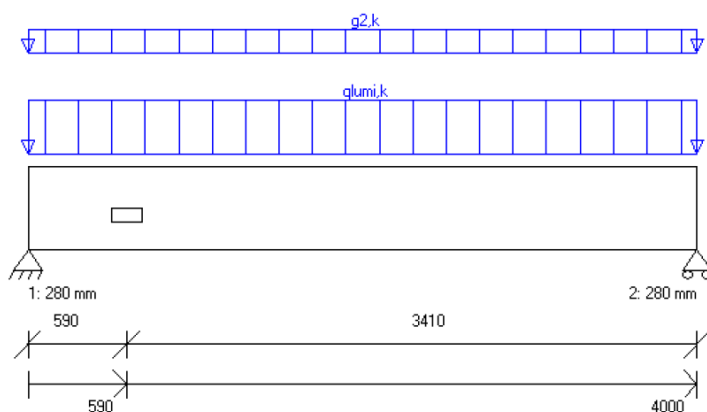
Tuki:	Sijainti x [mm]:	Leveys [mm]:	Tyyppi:
1:	0	280	Kiinteä niveltuki (X,Z)
2:	4000	280	Liukutuki (Z)

fm,k (My):	41.38 N/mm ²
fm,k (Mz):	50.00 N/mm ²
fc,0,k:	35.00 N/mm ²
fc,90,k:	6.00 N/mm ²
ft,0,k:	34.40 N/mm ²
ft,90,k:	0.80 N/mm ²
f _{v,k} (V _z):	4.20 N/mm ²
f _{v,k} (V _y):	2.30 N/mm ²
E _{mean} :	13800 N/mm ²
G _{mean} :	600 N/mm ²
E 0.05:	11600 N/mm ²
G 0.05:	400 N/mm ²
Tilavuuspaino:	5.10 kN/m ³ (omapainon laskentaa varten)
km-kerroin:	0.70
kcr-kerroin:	1.00

Osavarmuusluku: 1.20

Aikaluokka:	kmod:
Pysyvä:	0.600
Pitkäaikainen:	0.700
Keskipitkä:	0.800
Lyhytaikainen:	0.900

Hetkellinen:	1.100		
kdef:	0.600		
Reikä:	Sijainti x [mm]:	koko:	Muoto:
1:	590	w=180,h=75,dz=33	kuorakaide

**KUORMITUSTIEDOT:**

Omapaino (Omapaino, Pysyvä):

Rakenneosan paino: QZ = 0.191 kN/m x = 0 - 4000 mm

Pintakuorma: 1: QZ = 1.000 kN/m² x = 0 - 4000 mm (g2,k)Lumikuorma (Lumikuorma Sk<2.75 kN/m², Keskipitkä):Pintakuorma: 1: QZ = 2.200 kN/m² x = 0 - 4000 mm (qlumi,k)**MITOITUS:**

Mitoitusstandardi:

EN 1995-1-1:2004 + A1:2008 + A2:2014 + RIL 205-1-2017

Kokonaiskäyttöaste:

140.5 %

MITOITUSPARAMETRIT:

Nurjahdus on estetty molempiin suuntiin (y ja z)

Kiepahdus on estetty

MITOITUKSEN ÄÄRIARVOT:

Tarkastelu:	Mitoitusarvo:	Raja-arvo:	Käyttöaste *):	Sijainti x:	
Leikkaus (z):	62.74 kN	70.00 kN	89.6 %	0 mm	Yhdistelmä 5/1, Keskipitkä
Taivutus (My):	62.74 kNm	86.22 kNm	72.8 %	2000 mm	Yhdistelmä 5/1, Keskipitkä
Poikittaisveto (Sigma t,90):	0.60 N/mm ²	0.43 N/mm ²	140.5 %	500 mm	Yhdistelmä 5/1, Keskipitkä
Tukipaine, tuki 1:	62.74 kN	88.50 kN	70.9 %	0 mm	Yhdistelmä 5/1, Keskipitkä
Tukipainekerroin = 1.05					
Tukipaine, tuki 2:	62.74 kN	88.50 kN	70.9 %	4000 mm	Yhdistelmä 5/1, Keskipitkä
Tukipainekerroin = 1.05					

LISÄMITOITUSTULOKSET:

Tarkastelu:	Mitoitusarvo:	Raja-arvo:	Käyttöaste *):	Reikä/nivel (sijainti x):	
Leikkaus (z):	47.05 kN	59.50 kN	79.1 %	Reikä 1 (500)	Yhdistelmä 5/1, Keskipitkä
Taivutus (My):	31.56 kNm	82.71 kNm	53.7 %	Reikä 1 (590)	Yhdistelmä 5/1, Keskipitkä
Poikittaisveto (Sigma t,90):	0.60 N/mm ²	0.43 N/mm ²	140.5 %	Reikä 1 (500)	Yhdistelmä 5/1, Keskipitkä

ÄÄRIARVOJEN KUORMITUSYHDISTELMÄT

Yhdistelmä 5/1 (Keskipitkä):

1.15*Omapaino + 1.50*Lumikuorma

VOIMASUUREIDEN ÄÄRIARVOT:

Tulos:	Maksimiarvo:	Sijainti x:
V _{z,max}	62.74 kN	0 mm
M _{y,max}	62.74 kNm	2000 mm

HUOMIOT:

- EN 1995-1-1-standardin, sen täydennysosien A1:2008, A2:2014 ja Suomen kansallisten liitteiden sekä RIL 205-1-2017 -suunnitteluohjeen mukainen laskenta
- VTT on tehnyt kolmannen osapuolen tarkistuksen ohjelmalle (VTT-S-03665-17 ja VTT-S-05393-17)
- MRT = Murtorajatila, KRT = Käyttörajatila
- *) Yhteisvaikutustarkasteluissa %-luku tarkoittaa mitoitusarvon ja raja-arvon suhdetta, ei todellista käyttöastetta
- Liittyvän alapuolisen rakenteen tukipainekestävyys tulee tarkistaa erikseen
- Mitoituksessa ei huomioida ulokkeiden alle 20 mm taipumaa ylöspäin
- Värähtely- ja taipumatarkastelua ei tehdä alle 200 mm pituisille ulokkeille
- Reiät on huomioitu laskennassa
- Leikkausmuodonmuutos on mukana käyttörajatilamitoituksessa
- Leikkausmuodonmuutos ei ole mukana voimasuureiden laskennassa
- Leikkausvoiman pienentäminen on otettu huomioon tukien läheisyydessä ja lisäksi on oletettu, että kuormat vaikuttavat tukipintaan nähden rakenneosan vastakkaisella puolella
- Leikkausvoiman pienentäminen on tehty kuormitusyhdistelmien leikkausvoimakäyrään ja pienennyskohtana on mitta 0.9xH tuen reunasta
- Rakenneosan koon vaikutus lujuteen on otettu huomioon ominaisarvoissa kertoimilla kh ja kl
- Suunnittelijan tulee kiinnittää huomiota myös rakennedetaljeihin ja varmistaa,

ettei rakenteisiin muodostu vesitaskuja
- Reikien lujuusmitoitus sisältyy leikkaus- ja taivutusmitoitukseen

Laskelmissa ei ole huomioitu rakennusaikaisia kuormia eikä kosteusolosuhteita. Mahdolliset rakennusaikaiset lisätuennat on mitoitettava erikseen. Rakennuksen kokonaisjäykistystä ja siitä johtuvia vaakavoimia ei ole huomioitu. Rakenneosan (palkki, pilari, laatta) soveltuvuus kokonaisuuteen on päärakennesuunnittelijan tarkistettava erikseen.

Finnwood-ohjelmistolla tehdyt laskelmat ja tulosteet ovat voimassa vain ohjelmistoon tallennettujen Metsäliitto Osuuskunta, Metsä Woodin tuotteiden kanssa. Nämä tuotteet on tarvittaessa osoitettava rakennuspaikalla hankkeen osapuolille sekä viranomaisille. Metsäliitto Osuuskunta, Metsä Wood tai sen tytäryhtiöt eivät vastaa käyttäjälle tai kolmannelle osapuolelle muiden valmistajien tuotteista tai niiden käytöstä Finnwood-ohjelmistossa, ohjelmiston perusteella näin tehdyistä laskelmista ja tulosteista tai kolmansien valmistajien tuotteista tai niiden käytöstä aiheutuneista virheistä, menetyksistä tai vahingoista. Näitä ehtoja ei saa poistaa tulosteesta.
