



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Ilkka Juselius

Kantavien puurakenteiden vauriot ja korjaussuunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennetekniikka

Insinöörityö

15.04.2021

Tekijä Otsikko	Ilkka Juselius Kantavien puurakenteiden vauriot ja korjaussuunnittelu
Sivumäärä Aika	33 sivua + 18 liitettä 09.04.2021
Tutkinto	Rakennusinsinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine	Rakennetekniikka
Ohjaajat	Toimitusjohtaja, Ins. AMK, Valtteri Vaarsalo Tutkintovastaava, Lehtori, Mauri Konttila
<p>Tutkimustyön aiheena oli kantavien puurakenteiden vauriot ja vauriomekanismit sekä näille vaurioille tiedossa olevien korjausmenetelmien käytettävyys Suomessa.</p> <p>Työn tavoite oli kerätä materiaalia ja tietoa rakennesuunnitteluun, korjausrakentamiseen sekä myös uudistuotantoon. Tutkimalla eri vaurioita ja niiden mekanismeja mahdollisimman laajasti, pystytään tietoa käyttämään hyväksi myös uuden rakenteen suunnitteluvaiheessa. Huomioimalla vauriomekanismit voidaan välttää yleisimmät vauriotyypit rakennesan käyttöönsä aikana.</p> <p>Tutkimuksessa kerättyä materiaalia voidaan käyttää suoraan rakennesuunnittelussa, erityisesti korjausrakentamisessa, mutta tapaukset ovat aina yksilöllisiä eikä yleistyksiä voida tehdä. Tutkimukseen ei sisällynyt laboratoriokokeita tai koeistuksia. Korjausmenetelmille on esitetty saatavilla olevat kaavat eurokoodin mukaan, joilla korjausmenetelmän toimivuus pystytään todistamaan laskennallisesti. Kaikkia korjausmenetelmiä ei pystytä laskennallisesti todistamaan, joka tekee niistä työmenetelmän varaisia eli täysin riippuvaisia urakoitsijan suoritteesta.</p> <p>Tutkimusmateriaaliksi valikoitui pääosin ulkomaalainen, keskieurooppalainen tutkimusmateriaali sekä erilaiset loppu-, maisteri- sekä diplomityöt. Tehdessäni tutkimusta huomasin kuinka muualla Euroopassa puurakentamisessa ollaan edellä, kaikilla osa-alueilla. Esimerkiksi korjausrakentamisessa käytetään standardina hiilikuitu- tai komposiittivahvikkeita, joiden käyttö ei vielä Suomessa ole mahdollista puutteellisten kokeiden ja hyväksyntädokumenttien vuoksi. Betonirakenteille näitä menetelmiä voidaan käyttää ja ne ovat hyväksytyjä.</p>	
Avainsanat	Puurakenteet, vauriomekanismit, korjausrakentaminen

Author Title	Ilkka Juselius Structural Timber, Failure Modes and Repair
Number of Pages Date	33 pages + 18 appendices 15 th of April 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Professional Major	Structural Engineering
Instructors	Valtteri Vaarsalo, Nodetec Oy Mauri Konttila, Metropolia UAS
<p>The purpose of this thesis was to conduct a research into and the gather information on the various damage modes, failure modes, and repair methods for structural and glulam timber. The thesis was initially directed towards the repairing methods of the various damages, but its findings regarding failure modes and their root causes can also be applied to the design of new structures.</p> <p>The knowledge of how to predict and avoid damage to structural timber from the beginning of the design process helps the structural part to maintain its strength throughout its lifespan. Some repair methods can also be utilised solely as reinforcement for structural parts in the case of a change to the purpose of the structure, for example, to increase of bearing capacity.</p> <p>The repair methods represented in this study can be used directly in the repair design process. Generalisations are not available; every situation needs to be investigated individually. This study did not include any laboratory or mechanical testing of the listed procedures. Most of the reinforcement methods can be verified by calculation with the guidance of Eurocode 5. Some methods rely solely on the technique and skill of the contractor.</p>	
Keywords	structural timber, failure modes, repair construction

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Kantavat puurakenteet Suomessa	2
2.1	Liimapuu kantavana rakennusmateriaalina	2
2.2	Materiaalikäsitteet ja -määritelmät	3
2.3	Liima	4
3	Vaurio- ja murtomekanismit	6
3.1	Vauriomekanismit	6
3.1.1	Fysiologiset vaurion aiheuttajat	6
3.1.2	Biologiset vaurion aiheuttajat	7
3.1.3	Puun kuivuminen	9
3.2	Murtomekanismit	10
4	Vauriot	12
4.1	Halkeamat	13
4.1.1	Leikkausrasituksesta syntyneet halkeamat	15
4.1.2	Taivutetun palkin halkeamat	16
4.1.3	Puristetut rakenneosat	17
4.1.4	Vedetyt rakenneosat	18
4.2	Liitokset	19
4.2.1	Liitokset palkin kylkeen	21
4.2.2	Ripustusliitokset	22
5	Vaurioituneen rakenteen korjaus- ja vahvistusmenetelmät	23
5.1	Kosteusmuodonmuutos- ja liimasaumahalkeamien injektikorjaukset	23
5.2	Ruuvaus	24
5.3	Vanerivahvistus	25
5.4	Taipumien rajoittaminen vahvikkeilla	26
5.5	Proteesi	27
5.6	Rei'itetyn tai kaarevan palkin vahvistus	29
6	Loppupäätelmät	30

Lähteet	31
Valokuvalähteet	33
Liitteet	
Liite 1. Korjausmenetelmien mitoitus, eurokoodi 5:n mukaan	
Injektiokorjauksen mitoittaminen	5
Ruuvien kapasiteetin mitoittaminen	6
Vanerivahvistuksen mitoittaminen	9
Ulkoiset ja / tai sisäiset teräsvahvikkeet	10
Proteesi ja proteesin liitos	14
Rei'itetyn, lovetun tai kaarevan palkin vahvistus	16

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön lähtökohtana on tutkia kantavien puurakenteiden vaurioita ja vauriomekanismeja, niiden syitä ja ennakoitavuutta sekä korjausmenetelmiä vaadituin reunaehdoin. Opinnäytetyön lähtökohtainen tavoite on tuottaa ratkaisuja korjausrakennesuunnitteluun, eli työssä ei syvennytä puuteollisuuteen, logistiikkaan, työmaakulttuuriin tai ympäristö-, arkkitehtonisiin aiheisiin tarpeellista syvemmin.

Alkuidea opinnäytetyöhön kehittyi tehdessäni Valtteri Vaarsalon ohjauksessa liimapuu-palkkien kuntotutkimusta, Salon IOT Campuksella. Nodetec Oy on Helsingissä toimiva rakennesuunnittelutoimisto. Yritys tarjoaa korkeatasoisia rakennusteknisiä suunnittelu- ja konsulttipalveluita korjaus-, lisä- ja muutosrakennushankkeisiin sekä uudiskohteisiin. Vaikka pääsääntöisesti projektit ovat olleet luokkaa vaativa tai erittäin vaativa, on puurakenteisten kohteiden osuus ollut yllättävän vähäinen. Tästä ilmeisestä puutteesta johtuen aloitimme keskustelun ja ideoinnin. Listasimme eri asiat ja vaikuttavat tekijät joihin on tarpeellista syventyä, jotta saisin tarpeeksi laajalti lähtötietoja korjaussuunnittelupakettiin joka on tarkoitettu kantavien puurakenteiden paikallisiin korjauksiin, ei uusivaan rakentamiseen.

Opinnäytetyön tutkimuksen päätavoite on tarkastella rakenteiden vaurioita sekä vauriomekanismeja ja vaurioiden ilmenemistä mahdollisimman laajasti. Korjausdetaljeihin, -selostuksiin sekä eri tuotteisiin saadaan näin määriteltyä tarkat reunaehdot ja siten tarkennettua mikä korjaustapa tai -tuote sopii millekin vauriolle parhaiten. Valvova opettajan Mauri Konttilan sekä ohjaajana toimivan Valtteri Vaarsalon ehdotuksesta tutkimukseen sisällytetään myös EU-maiden markkinoilla olevia korjausvaihtoehtoja jos niiden katsotaan olevan toimivia myös Suomessa.

2 Kantavat puurakenteet Suomessa

2.1 Liimapuu kantavana rakennusmateriaalina

Liimapuu on pääasiallisesti kantaviin rakenteisiin kehitetty puutuote. Liimapuun tärkeimmät ominaisuudet ovat lujuus, jäykkyys ja kestävyys. Liimapuun laminoitivaikutuksen vuoksi se on lujuusominaisuuksiltaan suurempi kuin samansuuruinen yksittäinen sahatavarakappale. On erittäin epätodennäköistä että liimapuisen rakenneosan jokaisessa lamellissa sijaitsevat puun luonnolliset viat löytyisivät samasta kohdasta. Lujuusominaisuuksien lisäksi, myös ympäristöominaisuudet ovat hyvät. Liimapuun CE-merkintä ja valmistajan suoritusasoilmoitus tehdään rakennustuoteasetusten mukaisesti standardin EN 14080 mukaan. Suomessa käytössä on yleisimmin liimapuuta jonka lujuusluokka on GL30c tai GL30h.



Kuva 1. Liimapuutuotteita (www.versowood.fi)

Liimapuun valmistusprosessissa vaaditaan tarkkuutta sormijatkosten jyrsimisessä, liiman sekoittamisessa, liiman levityksessä sekä puristuspaheen ja -ajan valinnassa sekä ylläpitämisessä. Valmistusprosessin valvonta on jatkuvaa tuotannon sisäisessä laadunvalvonnassa, jotta liimapuisten rakennusosien laatu voidaan varmistaa. Lujuus- ja kestävyysominaisuuksien tutkimiseksi otetaan säännöllisesti koekappaleita. Yleisimmät käyttökohteet ovat pilari- ja palkkirungot yleisesti, kaarirungot, kehärungot, arinakupolit, palkkivälipohjat, kotelo- tai ripalaatat sekä erilaiset sillat.

2.2 Materiaalikäsitteet ja -määritelmät

Liimapuu

Liimapuu valmistetaan liimaamalla yhteen lujuuslajitellusta sahatavarasta mittallistettuja, yleensä sormijatkettuja, enintään 45 mm paksuja sahatavaramalleja. Sahatavaramallien syysuunta on liimapuutuotteen pituussuuntaan ja poikkileikkauksesta muodostuu suorakaide. Liimapuu on standardin EN 14080 mukaista, lisäksi se valmistetaan standardin EN 386 mukaan. Liimapuuta voidaan valmistaa horisontaalisena tai vertikaalisena tyyppinä.



Kuva 2. Sibelius talo, Lahti (www.versowood.fi)

Liimattu sahatavara

Kahdesta tai useammasta sahatavarakappaleesta liimaamalla valmistettu tuote. Ei täytä liimapuun standardeja. Kantaviin ja jäykistäviin rakenteisiin ja rakenneseisiin tarkoitettu liimattu sahatavara valmistetaan luvanvaraisesti.

Pilari-laattajärjestelmä

Pilari-laattaelementtijärjestelmässä runko muodostuu pilareista ja niiden varaan asennetuista laatta-elementeistä. Seinäelementit asennetaan yleensä vapaasti laattojen ja pilareiden väliseen tilaan.

Pilari-palkkijärjestelmä

Pilari-palkkijärjestelmässä rakennuksen runko muodostuu liima- tai viilupuisista pilareista ja palkeista, joiden varaan väli- ja yläpohjatasot sekä ulkoseinät asennetaan. Rungon jäykistys tehdään tavallisesti vinositein jäykkien liitosten avulla tai mastopilarein.

Viilupuu (LVL)

Kantaviin rakenteisiin tarkoitettu viilupuu, joka on standardin SFS-EN 14374 mukainen. Suomalainen viilupuu valmistetaan liimaamalla 3 mm paksuisia kuusiviiluja yhteen. Viilujen syysuunta on viilupuutuotteen pituussuuntaan (Kerto-S ja Kerto-T) tai osa viiluista voi olla asennettu ristiin (Kerto-Q). [Lähteet: RT 21-10978 ja RIL 205-1-2009]

2.3 Liima

Liimapuun valmistusprosessissa käytetään liimoja, jotka on tutkitusti suuri lujuus- ja kestävyysominaisuuksiltaan pitkällä aikavälillä kuormitettuna. Vaatimukset valmistuksessa käytettäville liimoille annetaan standardissa EN 14080 ja sen viitestandardissa EN 301, joka määrittää kaksi erilaista liimatyyppeä, liimatyypin I:n ja II:n. Vaihtoehtoisesti valmistaja voi käyttää EN 15425 vaatimukset täyttävää yksikomponenttista polyuretaani-liimaa. Jos valmistuksessa käytetään liimatyypin I mukaista liimaa, voidaan liimapuuta käyttää kaikissa käyttöluokissa (EC 5, KL 1,2,3). Jos valitaan liimatyypin II mukaista liimaa, liimapuuta voidaan käyttää vain säältä suojatuissa olosuhteissa (EC 5, KL 1-2). Liimapuu suojataan suoralta kosteuden, sateen ja auringonvalon pitkäaikaiselta vaikutukselta, jotta sen ominaisuudet kestäisi.

Nykyään ympäristösyistä käytetään melamiini-urea-formaldehydiliimaa, josta käytetään nimeä melamiiniliima tai MUF-liima. Nämä liimat ovat liimatyyppin I mukaisia liimoja. Nykyaikaisia MUF-liimoja käytettäessä liimapuun saumat pysyvät vaaleina, vanhemmissa palkeissa saumat voivat ajan myötä jonkin verran tummua. Lamellien sormijatkoksiin käytetään lähes pelkästään vaaleaa melamiiniliimaa. Sormijatkokset näkyvät vain ohuina viivoina rakennusosan pinnassa. Sormi-jatkoksiin voidaan vaihtoehtoisesti käyttää polyuretaaniliimaa (PUR-liimaa). Liimapuun merkinnöissä täytyy ilmoittaa valmistuksessa käytetty liimatyyppi (standardin EN 301 mukainen liimatyyppi I tai II).

Aiemmin valmistuksessa käytettiin yleisesti kaksikomponenttista fenoli-resorsinoli-formaldehydiliimaa (PRF-liimaa). PRF-liima on liimatyyppin I mukainen liima, ja liimasaumat tummat tai punertavan ruskeat. Nykyään PRF-liimaa käytetään harvoin, sitä käytetään lähes ainoastaan joihinkin tiettyihin ulkomaille vietäviin tuotteisiin. Rakenneliimojen kehitys on jatkuvaa. Tarkoituksena on kehittää ominaisuuksiltaan parempia ja ympäristöystävällisempiä liimoja.



Kuva 3. Liimapuubarasto (www.versowood.fi)

3 Vaurio- ja murtomekanismit

Kantavissa puurakenteissa lujuusominaisuudet vähenevät mekaanisten, fysiologisten ja biologisten vaurioiden vuoksi. Nämä vauriot, vaikuttavat kuorman kantokykyyn, huollettavuuteen ja yleiseen toimintakykyyn yksittäisessä rakenneosassa tai koko rakenteessa. Tutkiessa rakenteiden vaurioita on arvioitava rakenteen ajankohtainen käyttökelpoisuus sekä selvittää vaurio- ja / tai murtomekanismien syyt. Määrittää korjaustarpeen aikataulu sekä selvittää tapaukselle käytettävissä olevat korjaustavat ja -tuotteet.

3.1 Vauriomekanismit

3.1.1 Fysiologiset vaurion aiheuttajat

Fysiologiset vauriot ovat yleensä yhteydessä toisiinsa sekä mahdollisesti myös aiheuttavat otolliset olosuhteet biologisille vaurion aiheuttajille.

Aurinko

- Auringosta tuleva UV-säteily hajottaa puun ligniiniä.
- Vaikuttaa välillisesti lämpö- ja kosteusoloihin.

Lämpötilamuutokset

- Lämpötilamuutokset vaikuttavat puun kosteuteen ja kosteusliikkeisiin.

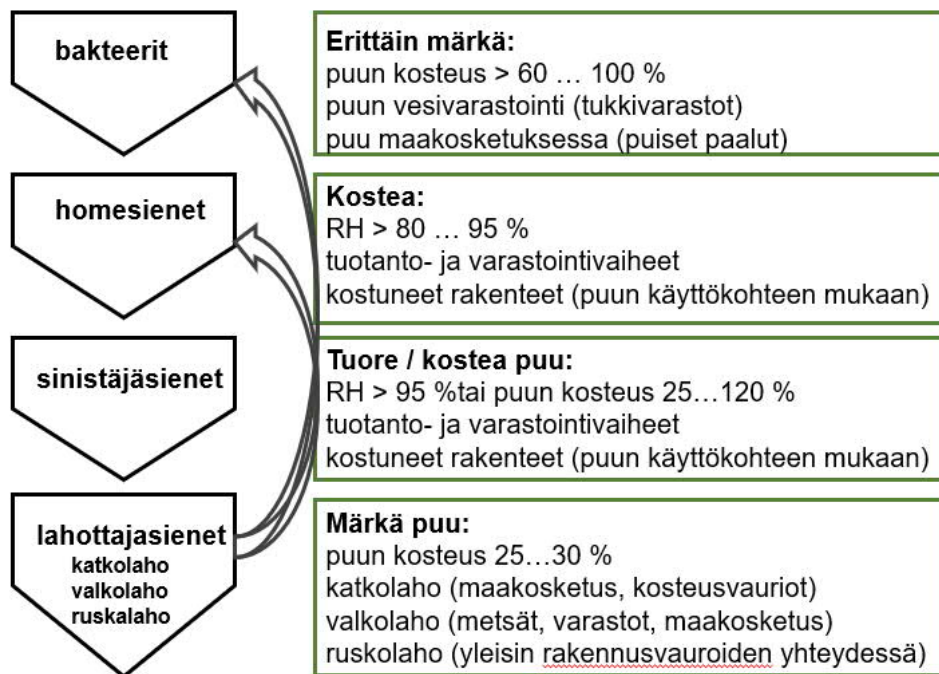
Kosteus

- Kuivuessaan puu halkeilee.
- Kosteus aiheuttaa tai edesauttaa biologisia vaurioita.

3.1.2 Biologiset vaurion aiheuttajat

Biologisia vaurioita aiheuttaa mm. bakteerit, homeet, sienet, hyönteiset ja lahot. Kaikki paitsi lahot, aiheuttavat puurakenteelle vain kosmeettisia vaurioita ja sisäilmahaittoja joita voidaan korjata sekä hallita mekaanisella puhdistuksella. Lahot päinvastoin käyttävät ravintonaan puun ligniiniä, joka johtaa puun lujuuden menetykseen, siksi ne voivat olla merkittävä vaurion aiheuttaja.

- Valkolaho; Esiintyy erityisesti kasvavissa puissa (etenkin lehtipuissa). Puu säilyttää muotonsa, mutta on pehmeää, kuitumaista ja vaaleata.
- Ruskolaho; Puu voi värjäytyä ruskeaksi, kutistua, haurastua ja rikkoutuu helposti kuutioiksi.
- Katkolaho; Puun pinnalla ei ole silmin nähtävää rihmastoja. Alkuperäinen muoto ja lujuusominaisuudet säilyvät pitkään. Pinta kuutioituu ja irtoaa ruutumaisesti. Pinnan alta terveen näköistä, mutta katkeaa helposti kohtisuoraan syitä vastaan kuormitettaessa.



Kuva 4. Puun mikrobiologinen turmeltuminen ja sen edellytykset kosteuden suhteen (VTT)

Yleisesti homevaurioiden korjaamisessa pyritään puhtaaseen ja turvalliseen lopputulokseen. Lähtökohtaisesti mikrobivaurioituneita epäpuhtauksia ei pidä jättää rakenteisiin, kuitenkin aina ei ole mahdollista uusia kaikkia vaurioituneita rakenneosia. Epäpuhtauksien sijainti, määrä ja ominaisuudet sekä niiden yhteys sisäilmaan vaikuttavat siihen, onko epäpuhtauksilla sisäilmaa huonontavia vaikutuksia. Vauriohavainnot ja epäilykset tulisi aina käsitellä tapauskohtaisesti, arvioidessa tilannetta on mikrobiologian osaaminen tai erillisen asiantuntijan käyttäminen tarpeellista.

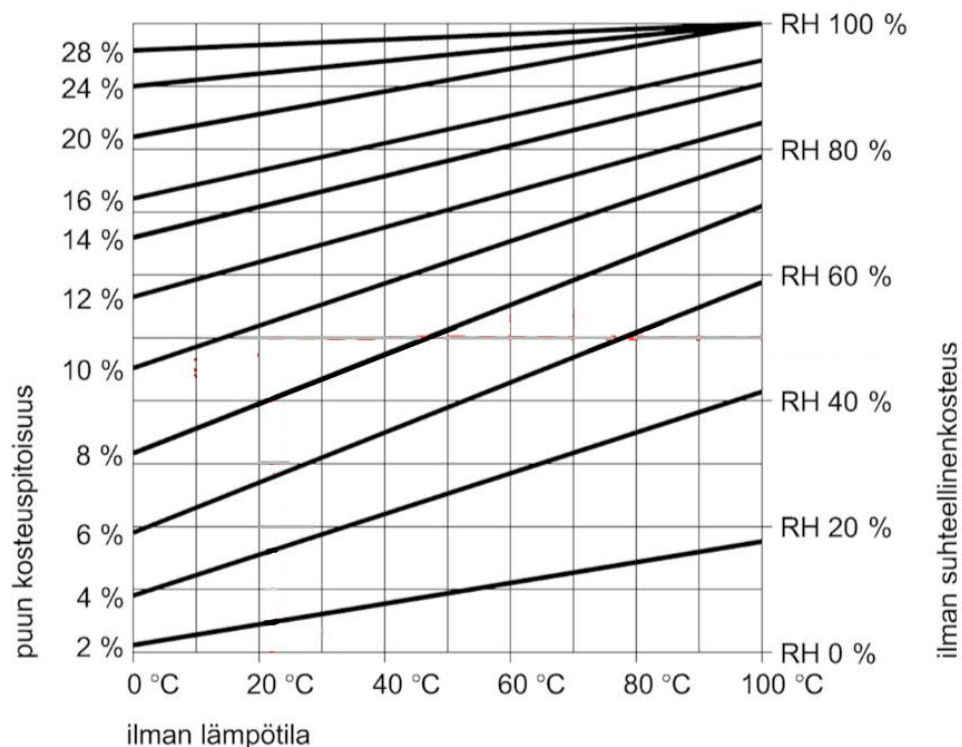
Ohuet puumateriaalit yleensä poistetaan, sillä puu toimii hyvänä ravintolähteenä homeelle tai sinistymälle. Kantavien- tai massiivipuurakenteiden pinnoilta home tulee poistaa terveeseen puuhun saakka. Home- ja sinistäjäsienet värjäävät usein alustansa, joten korjaussuunnitelmassa pitää määrittää vaadittava puhdistustaso. Kerroksen paksuus riippuu vaurion luonteesta, sekä pintakerroksen karheudesta ja huokoisuudesta. Periaatteessa tämä tarkoittaa sitä, että mitä käsittelemättömämpi, raaka pinta puulla on, sitä syvemmälle pintaa täytyy poistaa. Materiaali poistetaan mekaanisesti esim. teräsharjalla, hiomalla, vuolemalla, höyläämällä tai jyrsimällä.



Kuva 5. Pintavaurio puussa (Puujulkisivujen huolto- ja korjausmaalaukset, www.tikkurila.fi)

3.1.3 Puun kuivuminen

Kuivuminen sekä siitä johtuva kutistuminen lisää selvästi halkeiluvaaraa. Yleensä liimapuupalkkien ja -pilareiden valmistuskosteus on suuruusluokaltaan 10-12 %. Vaikka liimapuurakenteet kosteutuu hitaasti kosteassa ja / tai märässä ilmassa, on kosteusprosentti kuitenkin suurempi kuin tehdaskosteus. Varsinkin jos liimapuurakenteita asennetaan loppuvuodesta. Lämmityskaudella rakenne kuivuu valmistuskosteudestaan tai asennuksen aikaisesta kosteudesta. Ensimmäinen kuivumisajanjakso on vaarallisin halkeamien synnyn kannalta. Tulevat kuivumis- ja kostumisjaksot seuraavat vuodenaikojen vaihtelua, siten puu on kuivimmillaan keskimäärin maaliskuussa ja kosteimmillaan syys aikaan, ennen lämmityskauden aloitusta. Vuotuinen kosteuden keskiarvo on suunnilleen 10%, kuivin 5...8% välillä ja kostein 12...15% välillä. Puun kuivumisesta johtuvaa muodonmuutokseen perustuvaa lujuusarvoa pienennetään eurokoodi 5:n ohjeistuksen mukaan laskennallisesti, käyttöluokan ja kuorman vaikutusajan huomioonottavalla kertoimella k_{mod} .



Kuva 6. Puutavaran kosteuspitoisuuden riippuvuus lämpötilasta ja ilman suhteellisesta kosteudesta. (Puuinfo.fi)

Kantava rakenne saattaa myös kuivua epätasaisesti, joka lisää halkeiluriskiä. Yleisiä kohtia tällaiselle ovat palkkien päät, loveukset ja niiden reunat sekä reikien reunat. Halkeiluriskiä voidaan vähentää suojaamalla avonaiset ja leikatut pinnat kosteudensulkuun sopivalla aineella. Rakenteellisesti vaarallisimmat tapaukset ovat lovetuissa palkeissa. Lämpiviennit voivat olla vaarallisia jos palkin tai rakenteen läpi viedään ympäristöään korkeampi lämpötilaisia, eristämättömiä putkia. Myös lämpöeristämisessä on varottava ettei koko aukkoa täytetä jottei lämpö johdu eristeen kautta puuhun.

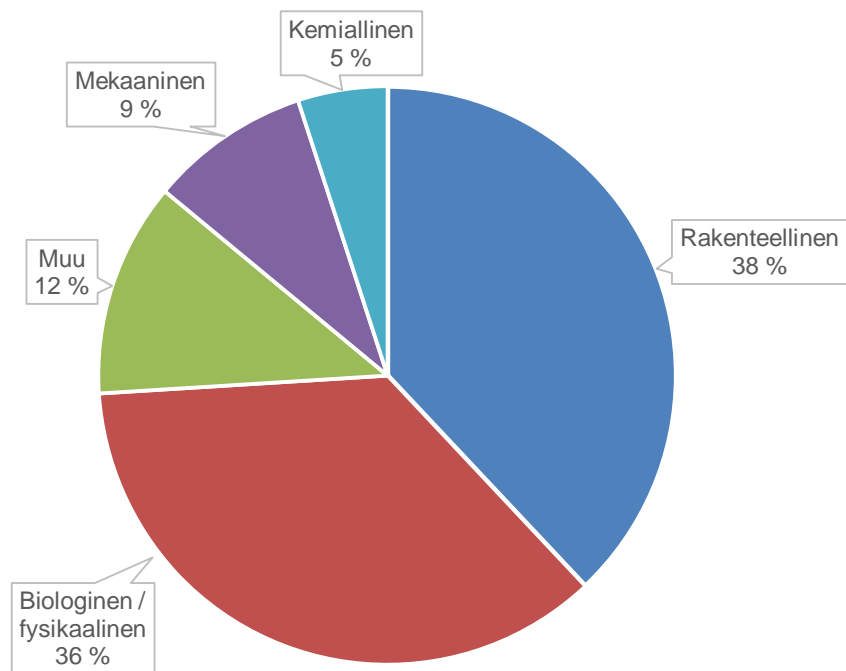


Kuva 7. IV-Lämpivienti palkissa (www.byggmek.lth.se)

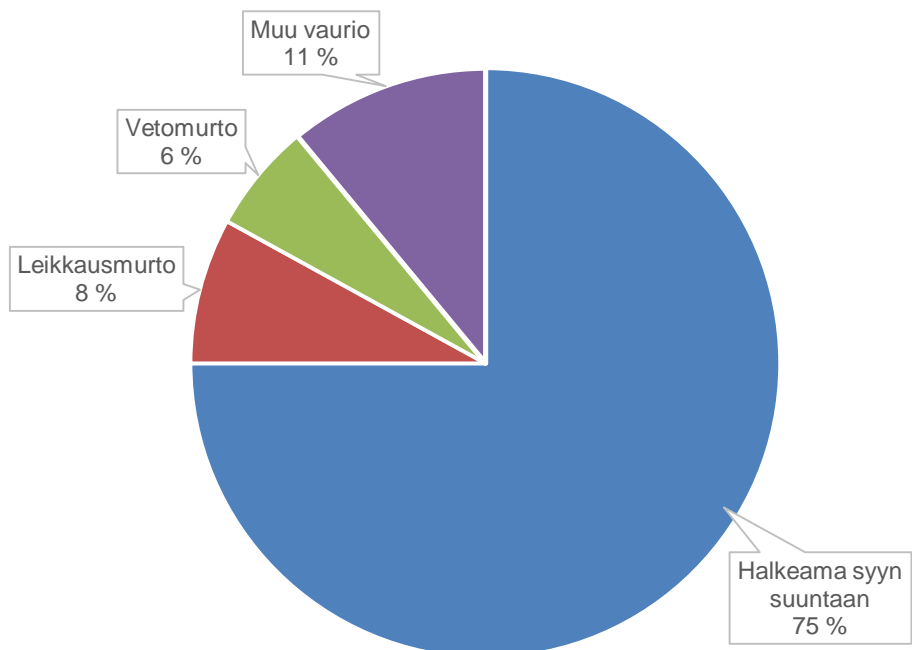
3.2 Murtomekanismit

Saksassa tehdyn, (Blass, Frese et. al., COST, 2011 [6]) laajan analyysin perusteella saadaan hyvä yleiskuva eri vaurioista ja niiden yleisyydestä. Tyypilliset vaurioiden syyt ja yleisimmät vauriot on esitetty taulukoissa 1 ja 2. Tyypilliset vauriot ja mahdolliset syyt niille on käsitelty tarkemmin luvussa 4. Tyypillisimmät tapaukset joissa vaurioita ilmeni (80%) olivat taivutetut rakenneosat eli esimerkiksi liimapuupalkit, sekä (8%) puristetut esim. pilari-rakenteet. Näissä tapauksissa tavattiin halkeamia laajasti (75%). Liimapuun halkeilun yleisimpiä syitä ovat; valmistus- tai materiaalivirheet, leikkausvastustuskapasiteetin ylittyminen, syitä vastaan kohtisuoran vetorasituksen ylittyminen ja puun kuivumisesta johtuvat kosteusmuodonmuutokset.

Taulukko 1. Tyypilliset vaurion aiheuttajat [6]



Taulukko 2. Tyypilliset vauriot [6]



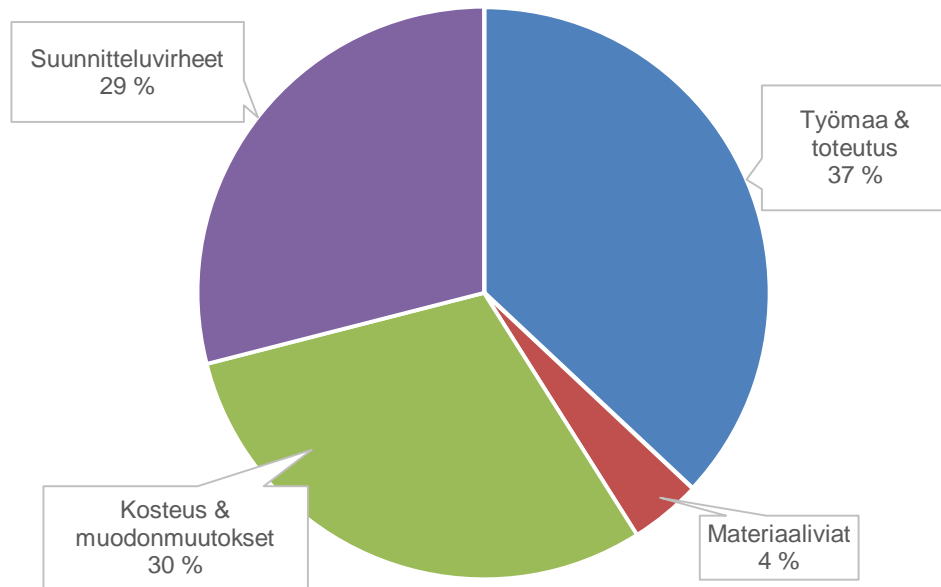
4 Vauriot

Suurin osa liimapuurakenteissa ilmenevistä vaurioista voidaan olettaa johtuvan pääasiallisesti muutamasta syystä; puun ortotrooppisista ominaisuuksista, kosteusmuodonmuutoksista sekä rakenteiden liitoksista ja reunaetäisyyksistä. Ortotrooppisuus tarkoittaa, että puun lujuus- ja kimmo-ominaisuudet ovat erilaiset syiden suunnassa ja syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Kantavia puurakenteita suunniteltaessa suuri osuus suunnittelutyöstä on liitosten ja niihin liittyvien reunaetäisyyksien tarkastelua. Kosteusmuodonmuutoksista johtuva paisuminen tai kutistuminen vaikuttaa erityisesti liitosten suunnitteluun. Poikkileikkausten kantokykykapasiteetin ylitykset ovat nykyään harvinaisia johtuen eurokoodin varmuuskertoimista, viimevuosina OTKES:n raporttien mukaan puurakenteiden vauriot ja / tai sortumat ovat pääosin johtuneet liitoksista. Vaikka tässä tutkimuksessa keskitytään puuhun materiaalina sekä suunnitteluprosessiin, ei vaurioiden syyt rajoitu pelkästään näihin asioihin. Myös työmaa ja -toteutus ovat osallisena puurakenteiden vaurioihin.



Kuva 8. Liimapuupalkin puristusvaurio yläpinnassa (leimapaine) (www.researchgate.net)

Taulukko 3. Vaurioiden jakautuma [6]



4.1 Halkeamat

Yleisin kantavien liimapuورakenteiden vaurio on halkeamat puun syy suunnassa. Ilmasto-olosuhteiden vaihtelu johtaa puun kosteusmuodonmuutoksiin, kutistumiseen ja turpoamiseen. Kosteuspitoisuuden epätasainen jakautuminen poikkileikkauksessa voi johtaa sisäisten jännitysten epätasaiseen jakaumaan, joka materiaalilujuuden ylittyessä johtaa hakeamiin jotka vähentää poikkileikkauksen kapasiteettia. Heikentyneen poikkileikkauksen jäljelle jäänyttä kapasiteettia ei pystytä todentamaan nykyaikaisin keinoin, mutta tutkimuksia laskentamalleille on käynnissä Keski-Euroopassa. Halkeamien määrä ja jakauma määräytyy monesta tekijästä, materiaalin laadusta ja laatuvirheistä, kuormista ja kuormituksesta, poikkileikkauksesta sekä liimauksen laadusta. Liimausvirhe näkyy liimapuussa lähes suorana halkeamana, liimasaumassa. Pahimmassa tilanteessa halkeama on samassa liimasaumassa rakenneosan molemmin puolin. Valmistusvirheet ovat kuitenkin melko harvinaisia. Kun halkeama on muualla kuin rakenneosan liimasaumassa, kyseessä on jokin muu vaurio kuin liimausvirhe.

Vaarallisuuteen vaikuttaa halkeaman koko, pituus ja halkeaman alueelle kohdistuva kuorma- ja rasitustilanne. Liimapuussa voidaan usein havaita pieniä kuivumisesta johtuvia halkeamia, joiden merkitys käytännössä kyseisen rakenneosan kantavuuteen on olematon. Tällaisia halkeamia ovat tyypillisesti suuruusluokaltaan 0...10 mm syvät, maksimissaan noin 1 m pituiset halkeamat. Kun kosteusvaihtelusta aiheutuvat muodonmuutokset päästetään tapahtumaan siten ettei muodonmuutoksia ole estetty kokonaisuudessaan tai osittain, jäävät vauriot ainoastaan esteettiseksi.

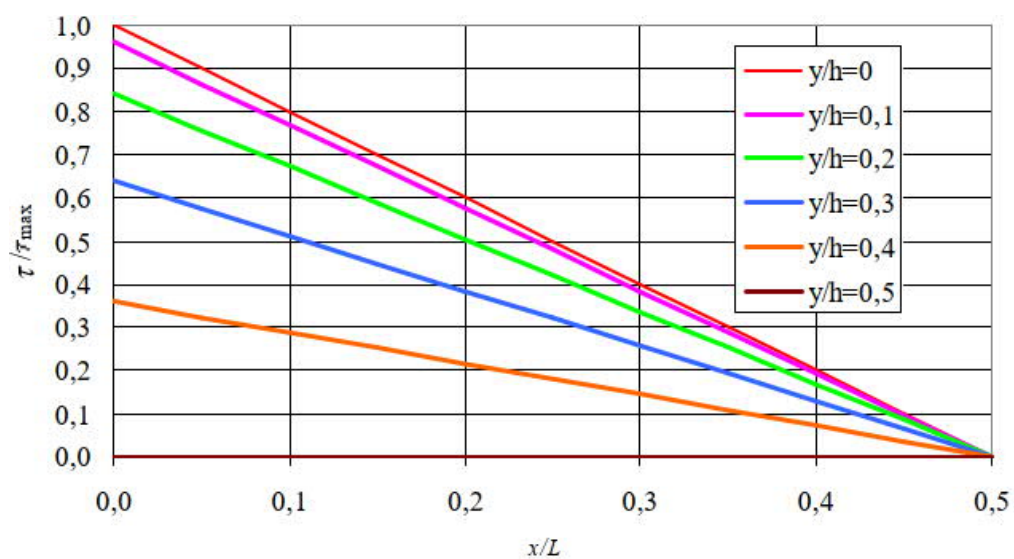
Halkeamat vedetyissä ja / tai puristetuissa rakenneosissa ovat usein toissijaisia verrattuna taivutettujen palkkien halkeamiin, sillä näihin rakenneosiin kohdistuu pääasiallisesti pituussuuntaisia rasituksia. Vedettyjen rakenneosien halkeilulla ei ole kantokykyyn merkitystä, jos sitä ei ilmene rakenneosan liitosalueilla. Halkeamat alentavat liitosten kapasiteettiä aina. Puristettujen rakenteiden kantavuus voi heikentyä, halkeamien ollessa suuria, sillä tällöin ne vaikuttavat myös rakenneosan nurjahduskapasiteettiin. Kun rakenteeseen tai rakenneosaan vaikuttaa syitä vastaan kohtisuoria kuormia, halkeamat ovat pääsääntöisesti aina vaarallisia. [7]



Kuva 9. Liimapuupalkin liimavirhe (Boise cascade, tech note BG-1)

4.1.1 Leikkausrasituksesta syntyneet halkeamat

Leikkausrasitusten ylitys näkyy palkin leveämmällä sivulla, pituussuuntaisena halkeamana. Useimmiten palkin tukialueella, palkin poikkileikkauksen korkeuden puolivälissä. Käytännössä tämä on harvinainen vauriotyyppi, joka edellyttää leikkausrasitusten ylittymisen lisäksi liimausvikoja ja / tai kuivumishalkeamia palkissa. Suurimmat leikkausrasitukset sijaitsevat rakenteissa todellisuudessa pienillä alueilla, joista niiden arvot pienenevät palkin pituussuuntaan tai korkeussuuntaan siirryttäessä. Esimerkkinä tästä, kuvassa 10 suoralle tasakorkealle palkille esitetyt arvot. Ne ovat normeerattu siten, että tuen lähellä oleva suurin mahdollinen arvo on 1.



Kuva 10. Leikkausjännitysten jakautuminen tasaisesta kuormasta (q), tasakorkeassa palkissa (VTT, 2006)

- Suurin poikkileikkauksen leikkausrasitus on vain puolet maksimiarvosta, jos ollaan etäisyydellä $L/4$ palkin päästä,
- Kauempana kuin etäisyydellä $0,2h$ korkeuden puolivälistä leikkausrasitus on korkeintaan $2/3$ -osaa suurimmasta arvostaan.

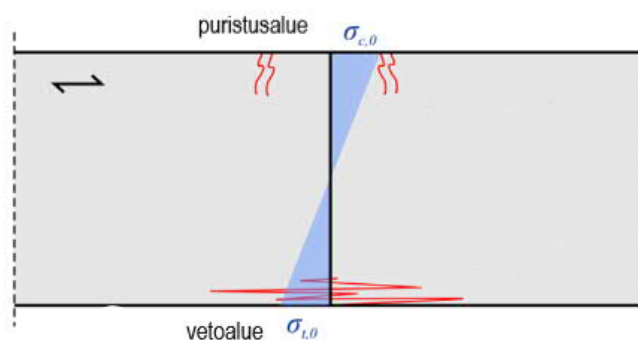
Yllä esitetyn käyrästä avustuksella pystytään arvioimaan rakenneosan (palkin) leikkausmurtoriskiä, jos halkeaman paikka ja syvyys palkissa on tiedossa. Useimmiten tällaiset halkeamat syntyvät muista syistä kuin leikkausrasitusten ylittymisestä. [7]

Lähtötilanteena voidaan olettaa, että leikkauskapasiteetti halkeaman kohdalla on pienentynyt sen syvyyden verran. Eli jos halkeaman syvyys on 1/4-osa palkin poikkileikkauksen leveydestä, voidaan kapasiteettia vähentää 75 %:n alkuperäisestä kapasiteetista. Halkeamien syvyyksien arviointi ja / tai mittaaminen tarkasti on hyvin haastavaa. Halkeaman syvyyden mittauksessa ei voida varmistua, että mittausväline on todella saatu esteettä halkeaman pohjaan saakka. Todellisuudessa suunnitteluohjeissa on otettu huomioon, että puisessa rakenneosassa voi olla leikkauslujuutta pienentäviä halkeamia. [7]

Eurokoodin ohjeistuksen (EN 1995-1-1) mukaan taivutettujen sauvojen leikkauskestävyysmitoituksessa huomioidaan halkeamien vaikutus käyttämällä poikkileikkaukselle tehollista leveyttä $b_{ef} = k_{cr} \times b$, jossa b on rakenneosan leveys. Käyttöluokassa 1 käytetään k_{cr} arvona 0,67. Käyttöluokissa 2 ja 3 saadaan käyttää arvoa 1,0.

4.1.2 Taivutetun palkin halkeamat

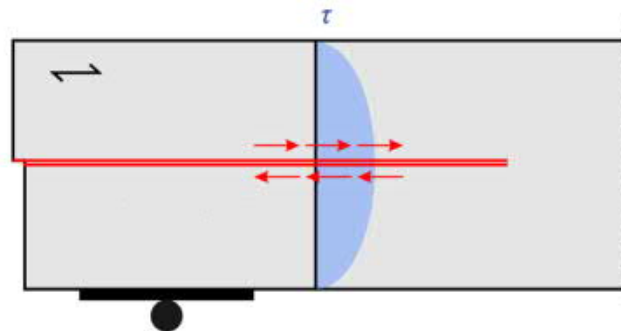
Taivutetuissa rakenneosissa jännitykset jakautuvat yläpinnassa puristusvoimiin, ja alapinnassa vetovoimiin, ne jakautuvat poikkileikkauksessa kuvan 7 mukaisesti. Tyypillisiä vaurioindikaattoreita ovat yläpinnan ”rypistymät” ja alapinnan sitkeä murtuma johtuen puukuitujen repeämisestä vedon vaikutuksesta. Taivutettujen rakenneosien halkeamat ovat vaarallisia, jos ne sijaitsevat suurten leikkausrasitusten alueella, pitkien jänneväliden, tasakorkeiden yksiaukkoisten palkkien tuilla poikkileikkauksen puolivälissä. Taivutusmurtuma luokitellaan kriittiseksi vaurioksi joka voi johtaa yksittäisen kantavan rakenneosan tai kokonaisen rakenteen rikkoutumiseen.



Kuva 11. Jännitysten jakautuminen taivutetussa palkissa (S. Franke et al. / Failure modes and reinforcement techniques for timber, 2015)



Kuva 12. Taivutetun liimapuupalkin murtuma sormijatkoksessa (www.ascelibrary.org)

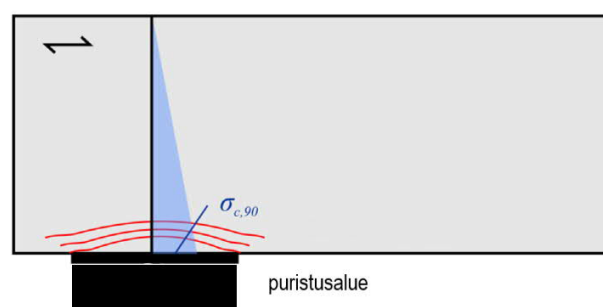


Kuva 13. Jännitysten jakautuminen taivutetussa palkissa puun syiden suunnassa (S. Franke et al. / Failure modes and reinforcement techniques for timber, 2015)

4.1.3 Puristetut rakenneosat

Halkeamat puristetuissa, pituus suuntaan kuormia siirtävissä rakenneosissa (ristikot, pilarit, pilasterit) eivät ole yhtä vaarallisia kuin taivutetuissa rakenneosissa. Vaurioita ilmenee pääsääntöisesti tuilla sekä liitosten alueilla, joissa kuormien on tarkoitus siirtyä. Puristettujen rakenteiden kantavuus heikkenee jos halkeamat ovat suuria, silloin ne vaikuttavat sauvan nurjahduskapasiteettiin sekä sitä kautta kuormien epäkeskeisyyteen ja uudelleen jakautumiseen kokonaisrakenteessa. Tämä voi johtaa ongelmiin yksittäisen rakenneosan tai rakenteen kokonais-stabiileetille.

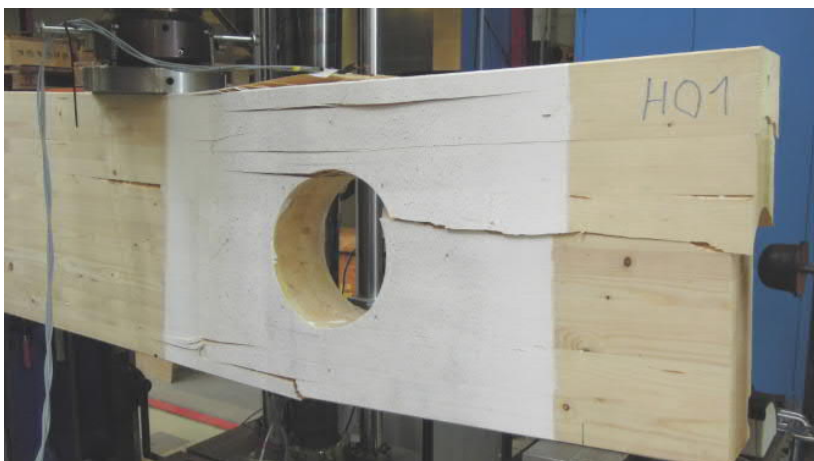
Puristusvoimista johtuvia vaurioita voi myös ilmetä tuilla tai liitoksissa, kisko- tai leimapainevaurioina. Nämä vauriot johtuvat puun syitä vastaan kohtisuorista jännityksistä, jolloin puun puristuskapasiteetti ei riitä siirtämään kuorman voimia. Tällöin puukuidut painuvat kasaan ja / tai murtuvat sitkeästi, samalla menettäen lujuuskapasiteettinsa.



Kuva 14. Jännitysten jakautuminen tuella (S. Franke et al. / Failure modes and reinforcement techniques for timber, 2015)

4.1.4 Vedetyt rakenneosat

Puun ominaisvetolujuus syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa on vain 2 % syiden suuntaiseen ominaisvetolujuuteen verrattuna, siten kuormia joista aiheutuu vetoa syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa tulee välttää. Tämä tulee huomioida suunnitteluvaiheessa. Palkin alareunaan tulevia liitoksia, isoja ripustuskuormia tai reikiä tulisi tästä syystä välttää, ripustuksista ja liitoksista lisää kohdassa 4.2.



Kuva 15. Vaurio reiän kohdalla. (Lada Ilic, Master thesis, Graz University of Technology, 2017)

4.2 Liitokset

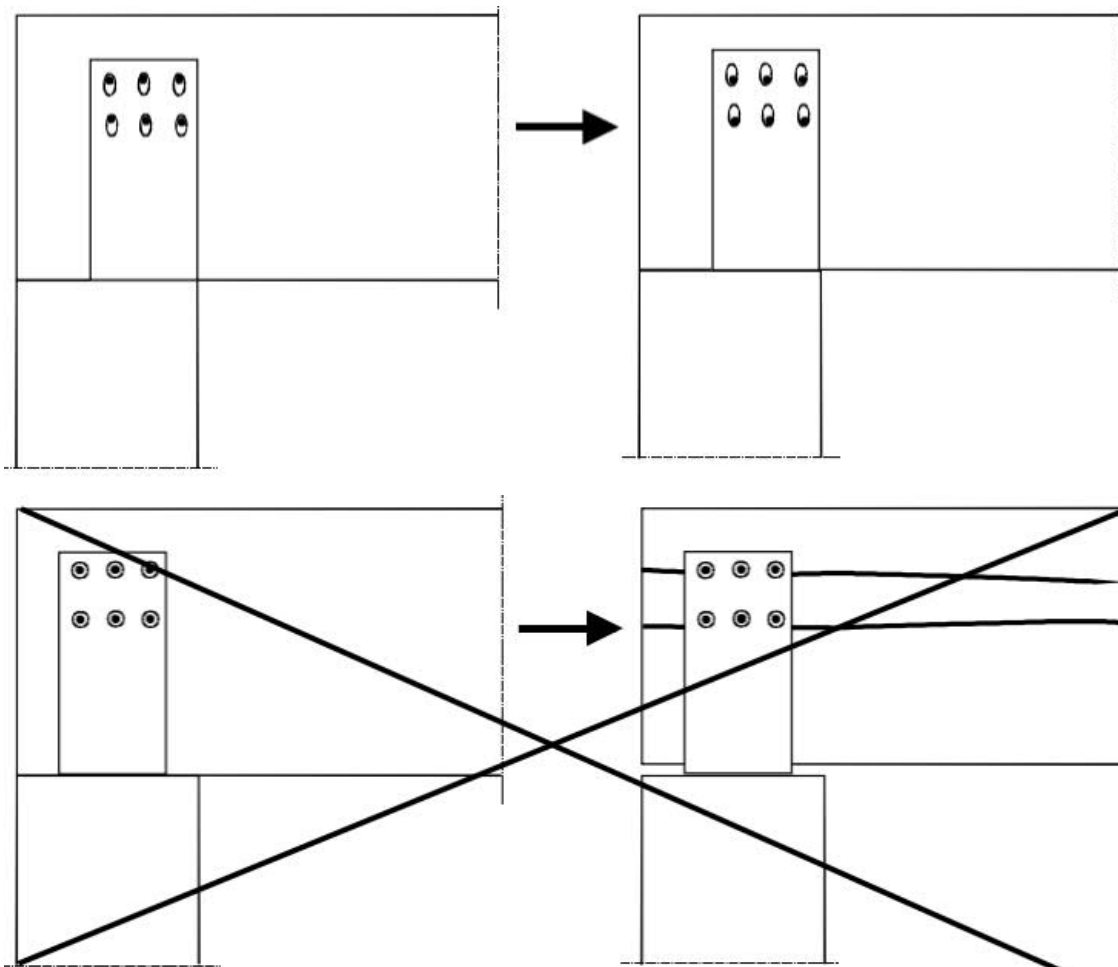
Liitoksissa on tärkeää ottaa huomioon puun kosteusmuodonmuutokset, tästä johtuen halkeamat liitoksissa johtuu yleensä siitä ettei puun muodonmuutoksille ei jätetä tilaa. Lisäksi erityistä huomiota on kiinnitettävä siihen, että reunaetäisyydet ovat toteutettu oikein. Liian pienet etäisyydet heikentävät liitoksen lujuutta.



Kuva 16. Halkeillut BSB-liitos (Nodetec Oy)

Liitoksissa nimenomaan puun kuivuminen lisää vaaraa halkeilulle, tilanteessa syntyy syitä vastaan kohtisuoria sisäisiä vetorasituksia jos kosteusmuodonmuutokset ovat tavalla tai toisella estetty. Jos muodonmuutokset on estetty, puun kuivuessa syntyy halkeamia, jotka heikentävät palkin tai pilarin kantavuutta. Muodonmuutoksia estäviä rakeneosia ovat esimerkiksi palkin teräskiinnikkeet tuilla ja laajalle alalle syiden suuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa oleva puuhun kiinnitetyt teräsosat.

Teräsosilla kylkiin kiinnitetyn palkin liitostapa on havainnollistettu kuvassa 17. Palkin kuivumisesta johtuvan kiertymän vaikutus teräsosien ja palkin välisen liitoksen rasitukseen pienenee, jos teräsosien sijainti suunnitellaan mahdollisimman lähelle pilarin sisäreunaa. Tavoitteena on toteuttaa liitos siten että jos mahdollista, teräsosien reiät tehdään soikeiksi ja liitospuikot kohdennetaan reikien ylälaitaan. Kun palkki kuivuu ja kutistuu, liitinpaukot siirtyy soikeissa rei'issään ja palkki jää ehjäksi.



Kuva 17. Teräslevyillä toteutettu palkin liitos (Puurakenteiden halkeilu. VTT, 2006)

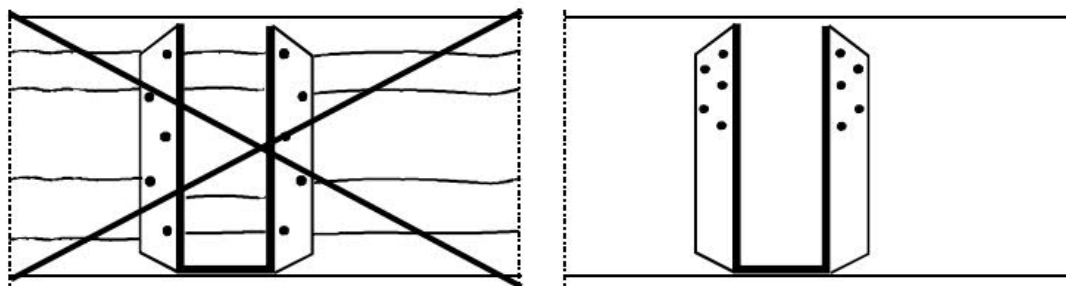
Jos liitos tehdään liian ”tiukkana”, kuivuessaan palkki jää roikkumaan liitinpuikkojen varaan ja palkin pääty murtuu ja / tai halkeaa syitä vastaan kohtisuoran vetolujuuden ylittyessä reikien kohdalta. Kun palkkia ei ole kuormitettu, voidaan liitos korjata kiilaamalla rako umpeen esimerkiksi vanerilla.

Nämä Suomessa yleisemmin käytössä olevat liitokset voidaan toteuttaa aiemmin mainituin muodonmuutokset huomioon ottavin reunaehdoin, mutta esimerkiksi Keski-Euroopassa yleisimmille tappivaarnaliitoksille (esim. BSB-järjestelmäliitos, WS-järjestelmäliitos) ei tätä tapaa voida käyttää. Tappivaarnaliitosten käyttö on Suomessa vähäistä, johon tiedon ja perinteiden puutteesta sekä suunnittelussa että valmistuksessa.

Tappivaarnaliitos tehdään yhdellä tai useammalla teräslevyllä, se voi myös olla tyypiltään puu-puu-puuliitos. Liitoksen pitää yhdessä sidepultit. Sidepultit ovat usein tappivaarvoja, joiden päät on kierteistetty muttereita varten. Pyöröteräspuikon päät on viistetty tai pyörästetty ja se on sileäpintainen jottei porattuun reikään asennettaessa se riko puuta. Tappivaarnan halkaisija on minimissään 6 mm ja enintään 30 mm. Vaarnatapit voidaan upottaa puuhun ja peittää, jolloin liitoksesta saadaan melko näkymätön sekä esteettisesti paremman näköinen. Tappivaarnaliitosten etu verrattuna pulttiliitokseen on tarkan sovituksen vuoksi pienemmät liitossiirtymät ja huomaamattomampi liitos sekä halvemmat liittimet.

4.2.1 Liitokset palkin kylkeen

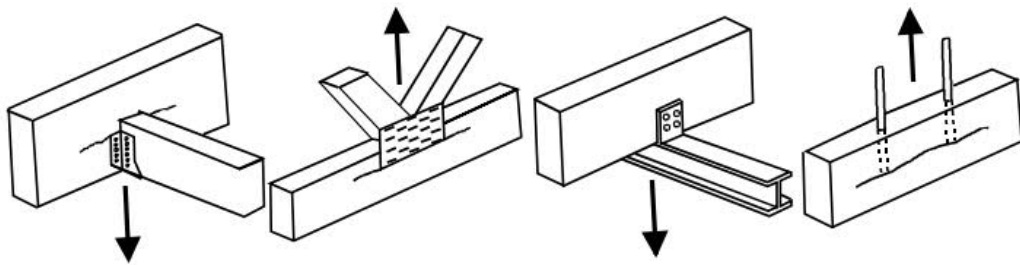
Syitä vastaan kohtisuoraan vetorasitetun liitoksessa ilmenee lisärasituksena kutistumisesta aiheutuva sisäinen vetojännitys, syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Tämä johtaa halkeamiin palkissa, jotka kulkevat puikko- tai vaarnaliittimien kohtien läpi. Nämä vauriot ovat vakavia, sillä halkeamat syntyvät todennäköisesti silloin, kun RH on pieni eli esimerkiksi lämmitetyssä tilassa talvella. Talvella rakenneosaa on todennäköisesti myös lumikuorman vaikutuksen alaisena, joten kuormitus on tilanteessa suuri.



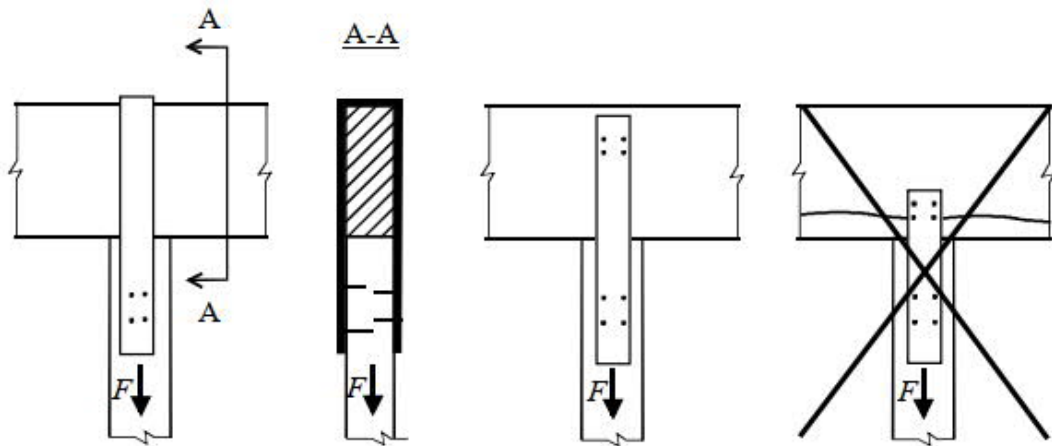
Kuva 18. Puupalkkikenkä ripustusliitoksen aiheuttamia vaurioita (Puurakenteiden halkeilu. VTT, 2006)

4.2.2 Ripustusliitokset

Ripustusliitoksiksi lasketaan liitokset, joilla esimerkiksi ripustetaan sekundääripalkit primääripalkeista. Puun vetolujuuden ollessa pieni, lähelle palkin alareunaa tehdyn liitoksen voimat voivat halkaista puun etenkin jos puun kosteusmuodonmuutoksista johtuen puu on päässyt kuivumaan nopeasti. Ripustusten mitoituksessa on huomioitava myös puun kapasiteetti, syitä vastaan kohtisuorassa. Liitoksen kapasiteettiin vaikuttaa ratkaisevasti sen sijainti palkin korkeussuunnassa sekä kuinka leveä liitosalue on.



Kuva 19. Ripustusliitosten aiheuttamia vaurioita (Puurakenteiden halkeilu. VTT, 2006)



Kuva 20. Esimerkkejä ripustusliitoksista, oikealla virheellinen ripustusliitos (Puurakenteiden halkeilu. VTT, 2006)

5 Vaurioituneen rakenteen korjaus- ja vahvistusmenetelmät

Suunnitellessa ja valittaessa korjaus- tai vahvistusmenetelmää tulee ottaa huomioon alueen rasitukset, kuormat ja niiden suuruudet. Vauriot harvemmin toistuvat samanlaisina, joten korjaussuunnittelukaan ei ole suoraviivaista. Tässä tutkimuksessa on keskitytty paikallisiin korjaus- ja vahvistusmenetelmiin. Esitetyissä vaihtoehdoissa ei oteta kantaa korjausmenetelmien kokonaiskustannuksiin.

Pääosin korjaus- ja vahvistusmenetelmät rajautuvat rakenteellisen kapasiteetin palauttamiseen vaurioituneessa tai halkeilleessa rakenneosassa, murtuneen tai lahonneen osan vaihtamiseen paikalla sekä esteettisten vaurioiden eli pääosin halkeamien korjauksiin. Tavoitteena on alkuperäisen kantavuuden ja / tai lujuusominaisuuksien palauttaminen rakenneosassa. Osa alla luetelluista korjaus- ja vahvistusmenetelmistä soveltuu myös vaurioitumattoman rakenneosan kapasiteetin ja lujuusominaisuuksien parantamiseen.

5.1 Kosteusmuodonmuutos- ja liimasaumahalkeamien injektiokorjaukset

Injektointi on erityisesti aiheellista korkeiden leikkausvoimien alueella eli tukien läheisyydessä sekä niillä kohdin missä poikkileikkauksen vetojännitykset vaikuttavat puun syihin kohtisuorasti. Alle 10 mm leveät halkeamat joissa ei ole havaittavissa puukuitujen sirpaloitumista, sekä lisäksi palkin poikkileikkauspinta-alan alimmassa kolmanneksessa sijaitsevat irronneet liimasaumat, joiden pituus ylittää palkin jännemitan viidesosan voidaan korjata injeksiolla. Euroopan markkinoilta löytyy useita hyväksytyjä liimausaineita, mutta injektourakoitsijan on osoitettava ammattitaitonsa työnäytteellä tai ammattipassilla.

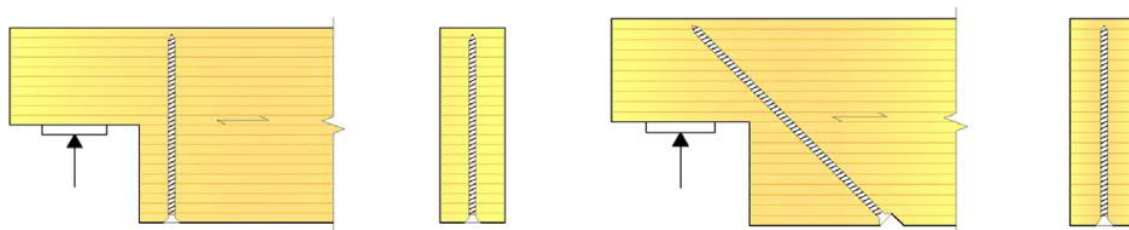
Injektiokorjauksen päätavoite on palauttaa rakenneosan kantokykykapasiteetti. Jotta lopputuloksen laatu pystytään varmistamaan, liimattavien pintojen valmistelutyöt täytyy tehdä huolellisesti. Ennen injektointia halkeamat tulee puhdistaa ja siistiä mekaanisesti sahalla, jyrsimellä tai rouhimella. Riippuen valitusta liimasta ja korjaustavasta, saattaa esivalmisteluihin kuulua myös sideaineen tai pohjusteen käyttö sekä ilma-aukkojen poeraus ennen itse injektiota. Työnaikainen tuenta tehdään tapauskohtaisesti, jos tilanne sitä vaatii.



Kuva 21. Injektiokorjattuja poikkileikkauksia (S. Franke et al. / Failure modes and reinforcement techniques for timber, 2015)

5.2 Ruuvaus

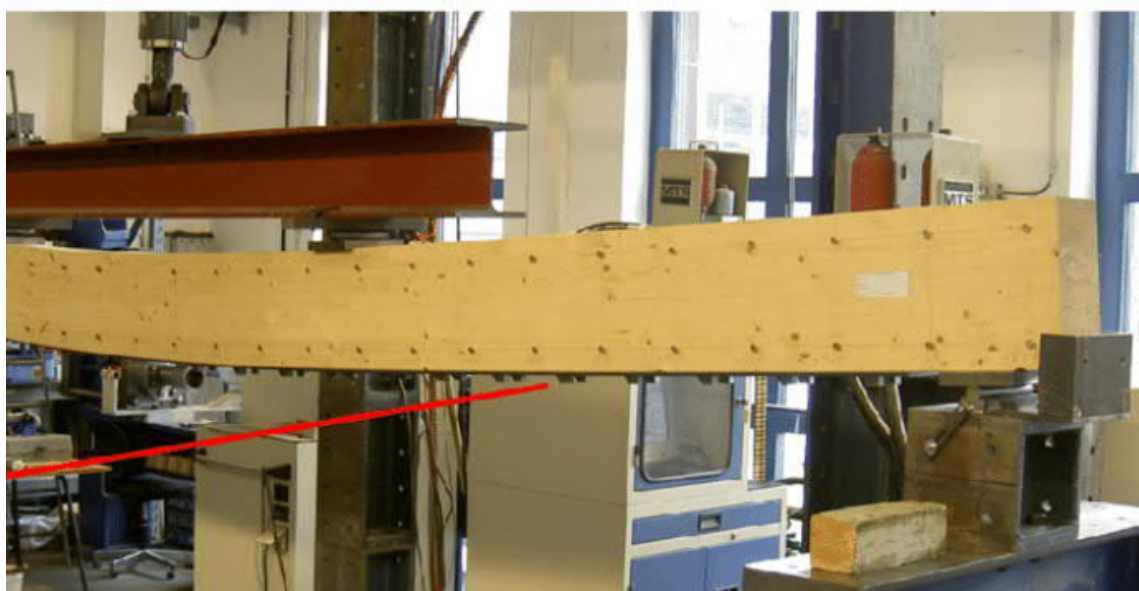
Liimapuupalkin ruuvaus tehdään usein liitosten ja lovetujen palkkien korjaamiseen tuella. Tämän lisäksi menetelmää voidaan myös käyttää halkeamien korjaamiseen. Se voidaan tehdä kierteellisellä tangolla, joka katkaistaan sopivaan mittaan tai käyttää itseporautuvia ruuveja. Pitkät ruuvaukset voivat kuitenkin halkaista palkin kosteusmuodonmuutosten vuoksi. Menetelmässä ruuvit tai ruuvitanko toimii leikkausraudoitteena, ottaen vastaan leikkausvoimien vaikutuksen ja siten vähentää puun rasituksia ja halkeilua. Tanko tai itseporautuvat ruuvit voidaan myös asentaa kulmassa ($\pm 45^\circ$) leikkausvoimien vaikutusalueella. Kanadassa tehdyn tutkimuksen ja kokeiden perusteella, (Dietsch P et al. Design of shear reinforcement for timber beams, 2013), rakenneosan leikkausvoimakapasiteettia pystytään kasvattamaan 20...33%, kun voimat vaikuttavat kohtisuoraan puun syitä, vahvikeraudoituksen alueella.



Kuva 22. Lovetun palkin ruuvaus (S. Franke et al. / Failure modes and reinforcement techniques for timber, 2015)

5.3 Vanerivahvistus

Kantavaa rakenneosaa voidaan vahvistaa vaneroimalla poikkileikkauksen kyljet vaurioalueella RIL 244-2007 ohjeen mukaan. Vanerit kiinnitetään liimaruuvaten, eli pinnan epätasaisuudet täytetään liimalla (esim. epoksi- tai polyuretaaniliimalla) ennen itseporautuvien ruuvien käyttöä. Ruuvien lujuus ja halkaisija valitaan mitoitusilanteen mukaan, mutta ruuvien on oltava kierteistettyjä kantaan saakka riittävän puristuksen aikaansaamiseksi. Liitoksessa puikkojen välinen etäisyys määräytyy vanerin paksuuden mukaan, etäisyytenä käytetään 7-kertaista vanerin paksuutta. Vaneroinnissa rakenteen murto-aurio tapahtuu sitkeästi, tämä tekee siitä lähestyvistä murrosta varoittavan korjausmenetelmän.

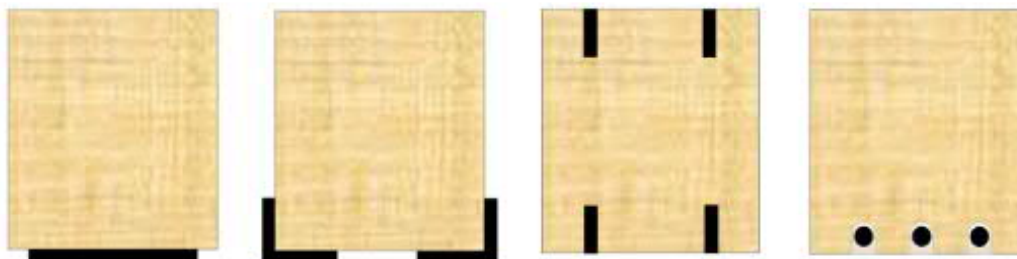


Kuva 23. Vaneroitu palkki koeistuksessa. (Martin Trautz et al. / Self-tapping screws as reinforcement for timber structures, 2017)

Vaneria voidaan käyttää myös ulkoisena vahvikkeena, ilman liimaruuvausta. Vahvikelevy kiinnitetään palkkiin ruuveilla, esimerkiksi ylittyneellä taivutusalueella. Kiinnikkeet mitoitetaan EN 1995-1-1 mukaan.

5.4 Taipumien rajoittaminen vahvikkeilla

Palkkien taipumien rajoittamiseen voidaan käyttää terästankoja, -levyjä tai muita profiileja sekä erilaisia polymeeriosia. Paikalliset vahvikkeet voidaan kiinnittää rakenneosaan mekaanisesti ruuvaten tai liimaruuvaten. Vahvikkeet voidaan kiinnittää rakenneosaan ulkoisesti tai sisäisesti, riippuen kuormitustilanteesta, rakenneosan sijainnista ja vahvistuksen tarpeesta. Sisäisesti lovetujen kiinnikkeiden liitos tehdään sideaineella, esimerkiksi käyttäen epoksiliimaa. Varsinkin palonsuojavaatimukset vaikuttavat vahvikkeiden sijoitukseen ratkaisevasti. Kantavien puurakenteiden yleisin murto tapahtuu hauraasti poikkileikkauksen vetorasituksen alueella, joten sijoittaessa vahvikkeen ko. alueelle saadaan optimoitua poikkileikkauksen taivutusvastusta. Vahvikkeen sijoittaminen vetorasitetulle alueelle siirtää neutraaliakselin palkissa alemmas, johtaen puristusrasitetun alueen kasvuun suhteessa siihen mitä vetorasitettu alue supistuu. Vahvistetun rakenneosan murto tapahtuu sitkeästi, mahdollisesti myöden, kun vahvistamattoman rakenteen murto on hauras ja äkillinen.



Kuva 24. Rakenneosan vahvistusmalleja, ulkoinen- tai sisäinen vahvistus. (S. Franke et al. / Failure modes and reinforcement techniques for timber, 2015)

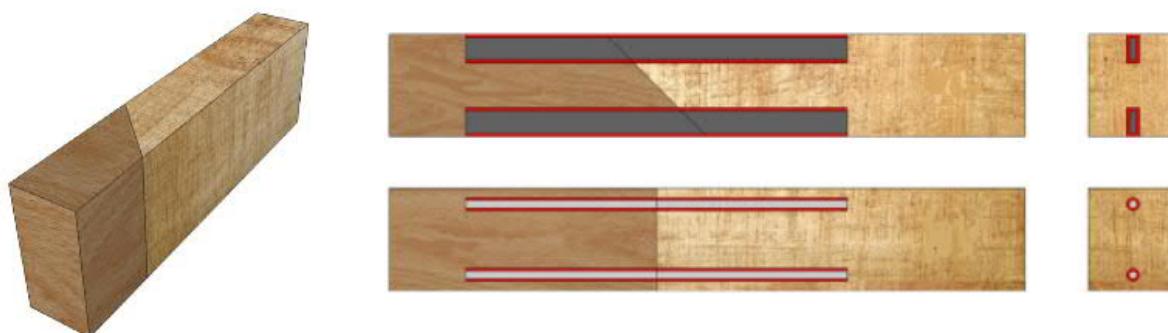
Kliger R. et al. / Strengthening timber with CFRP or steel plates – short and long-term performance, 2008, tehdyn tutkimuksen mukaan maksimikapasiteetin saavuttamiseksi 3/4 vahvikkeista tulisi sijoittaa poikkileikkauksen pohjaan (vetorasituksen alueelle), ja 1/4 yläpinnalle. Maksimi sitkeyden / plastisuuden saavuttamiseksi kaikki vahvikkeet tulisi sijoittaa rakenneosan pohjaan ottamaan vastaan vetorasitukset. Jos vahvikkeiden sijaintia ei haluta optimoida, voidaan ne sijoittaa ½ ylä- ja ½ alapintaan, jolloin saavutetaan keskiarvoisesti järkevin vahvistusmalli. Useimmiten työn määrä on suuri suhteessa

saavutettuun lopputulokseen, jos vahvikkeet jaetaan vahvistettava rakenneosan kummallekin pinnalle.

Vaikka vahvikkeina voidaan käyttää useita eri materiaaleja lähtien hiilikuiduista sekä aromaattisista polyamideista pohjautuviin vahvikkeisiin, on kuitenkin todennäköistä ettei Suomen kokoisilla markkinoilla niitä käytetä. Pääosin tämä johtuu suurista kustannuksista, hyväksyntöjen puutteesta ja verrattaen matalasta puurakentamisen taitotasosta.

5.5 Proteesi

Puurakenne johon on päässyt pitkäaikaisesti vaikuttamaan biologinen tai fysiologinen hajottaja on usein lujuusominaisuuksiltaan huonossa kunnossa. Nämä vauriot sijaitsevat paikallisesti usein palkkien tai pilareiden päissä joissa puu pääsee esimerkiksi kosketuksiin kivirakenteen kosteuden kanssa. Myös tulipalosta johtuvat paikalliset vauriot voidaan korjata tällä menetelmällä, jos rakenneosa on muilta osin hyvässä tai käytettävässä kunnossa. Proteesi voidaan liittää paikalleen jätettävään rakenneosaan viistosaumalla, sekä vaihtoehtoisesti vahvistamalla liitos puutapeilla, teräs-sauvoilla tai -levyillä, kuituvahvistetuin polymeerilevyin sekä viimeistelemällä liitos materiaaliin sopivalla liimalla tai sideaineella.



Kuva 25. Proteesi teräs-sauvoilla tai -levyillä liitettynä. (S. Franke et al. / Failure modes and reinforcement techniques for timber, 2015)

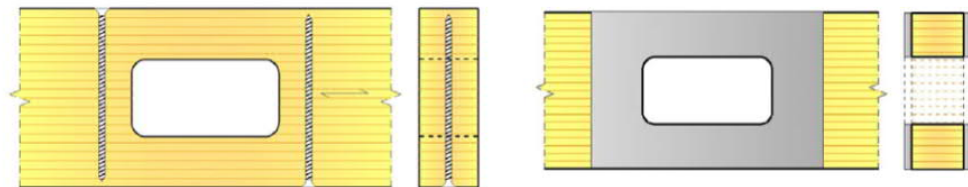
Proteesin asennustyössä on kiinnitettävä huomiota työnaikaiseen tuentaan, tuennan ajankohtaan. Ennen purkamista on varmistuttava että sideaine tai liima on kuivunut ja rakenneosia on kantokykyinen. Vaurioitunut osa sauvasta voidaan leikata joko 45° kulmassa tai suorakulmaisesti. Liitososat asennetaan joko porattuihin reikiin tai uriin, käytettäessä uritettua liitososaa tehdään uran päälle lopuksi puusta täyttöpalat palonkeston parantamiseksi. Proteesiosana on käytettävä ominaisuuksiltaan nykyistä vastaavaa poikkileikkausta, varsinkin rakenneosan kosteuspiitoisuuteen on kiinnitettävä huomiota, sen pitäisi olla sama tai lähellä korjattavaa osaa. Sideaineena tai liimana käytetään usein yksilöllistä epoksihartsia jonka päätarkoitus on pystyä sitomaan puu ja valittu liitosmateriaali toisiinsa lujasti. Lopputuloksena proteesi kantaa korjatun rakenneosan kapasiteetin verran kuormaa [11, 12]. Euroopassa toimiva Freyssinet Group tarjoaa jopa omaa tuotepäihettä proteesikorjauksille. Foreva Wood Scarf järjestelmän liitos toteutetaan loveamalla uuteen rakenneosaan urat komposiittiliittimille, jotka liimataan sideaineella nykyiseen, terveeseen puurakenneosaan.



Kuva 26. Foreva Wood, proteesikorjaus. (Freyssinet Group)

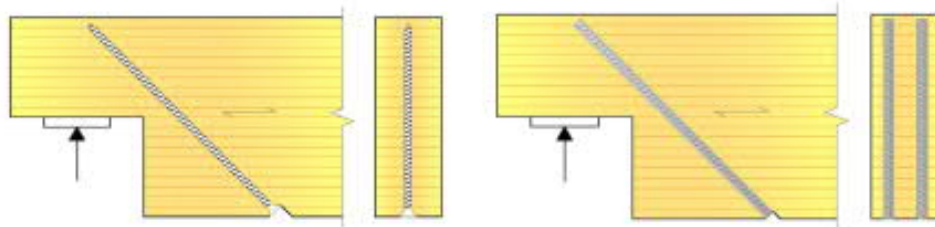
5.6 Rei'itetyn tai kaarevan palkin vahvistus

Todennäköisyydet vaurioille kasvaa rei'itetyissä, lovetuissa sekä kaarevissa palkeissa kun poikkileikkauksen muutosten vaikutusalueilla ilmenee jännityksiä puun syitä kohti-suoraan. Näillä alueilla on myös tavanomaisesti suuria leikkausvoimia. Vaurioita voidaan korjata tai pienentää ulkoisilla tai sisäisillä vahvikkeilla. Yleisimpinä korjaus- ja vahvistusmenetelminä käytetään aiemmin mainittuja ruuvaus- ja ulkoisia vahvikemenetelmiä. Vahvikkeina voidaan myös käyttää kuituvahvistettuja polymeerilevyjä, hiilikuitua tai komposiitteja, Suomessa vaihtoehtoisten vahvikkeiden käyttö vaikuttaa kuitenkin hyvin vähäiseltä.



Kuva 27. Palkin läpiviennin vahvistuksia. (S. Franke et al. / Failure modes and reinforcement techniques for timber, 2015)

Kaarevissa, harja- sekä viistetyissä palkeissa suurimmat vetorasitukset ilmenevät rakenneosan korkeimmalla, huipun alueella. Aluetta voidaan vahvistaa aiemmin mainituin menetelmin, ruuvaten ulkoisesti tai sisäisesti sekä vahvikelevyin. Lovetuissa rakenneosissa suurimmat ongelmat sijoittuvat loveuksen kulmiin, joista halkeamat useimmiten alkavat. Halkeaman alueella on usein myös suuret leikkausrasitukset johtuen tuen läheisyydestä, joka saattaa johtaa rakenneosan murtoon. Lovetun palkin vahvikkeet sijoitetaan mahdollisimman lähelle tukea, 45° asteen kulmaan [13].



Kuva 28. Lovetun palkin vahvistuksia. (S. Franke et al. / Failure modes and reinforcement techniques for timber, 2015)

6 Loppupäätelmät

Aloittaessani tutkimusta, olin jollain tasolla tietoinen puurakentamisen tilasta tai sen puutteesta Suomessa. Suurin osa ajantasaisesta tutkimustiedosta tähän työhön tuli Suomen rajojen ulkopuolelta. Tavoitteena oli kerätä uusin, optimoitu tieto eri menetelmistä korjaussuunnittelua varten ja sitä ei kotimaasta juurikaan löytynyt.

Suurin osa nykyaikaisimmista menetelmistä on käytössä naapurimaissa, mutta betoni-Suomessa ne eivät ole vielä hyväksytyjä. Suurin syy tähän on varmasti puurakenteiden vähäisyys rakennuskannassa, varsinkin suuret liimapuurakenteet ovat harvinaisuus verrattuna betoni- ja teräsrakenteiden määrään. Rakenteiden puute johtaa taas siihen että tietyistä menetelmistä tulee suhteellisen kalliita, jopa turhia hyväksyttää, jos niille ei ole käyttöä. Toisaalta on myös ymmärrettävää, että tutuissa korjaustavoissa pitäydytään jos ne ovat olleet käytössä pitkään ja ne ovat yksinkertaistettuja, toimiviksi todistettuja ratkaisuja. Jokainen vaurio tulisi tarkastella yksilöllisesti, ennen korjausmenetelmän valintaa.

Tässä tutkimuksessa mainittuja vahvistusmenetelmiä voidaan myös käyttää muussa korjaussuunnittelussa hyväksi. Vahvikkeiden käyttö ei rajaudu vain korjaamiseen, rakenneosien kapasiteettia pystytään kasvattamaan huomattavasti tarvittaessa esimerkiksi käyttötarkoituksen muutoksen yhteydessä. Samoilla menetelmillä pystytään myös lisäämään rakenneosan käyttöikä. Samoja saatuja tuloksia voidaan myös käyttää hyväksi uusien rakenneosien suunnittelussa. Varmistaa rakenneosan toimivuus ja pitkäikäisyys, sekä välttää rakenneosan halkeilu tai muut vauriot jo suunnitteluvaiheessa.

Lähteet

- 1 Puuinfo Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje (Eurokoodi 5)
- 2 RIL 205-1-2017. Puurakenteiden suunnitteluohje eurokoodi EN 1995-1-1, Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry, 2017, Hansaprint Oy, Vantaa
- 3 RIL 244-2007. Puurakenteiden jäykistyksen ja halkeilun hallinta, Suomen Rakennusinsinöörin liitto RIL ry, 2007, Hakapaino Oy, Vantaa
- 4 Liimapuukäsikirja osat 1-3, Suomen liimapuuyhdistys Ry ja Puuinfo Oy, 2014, (<http://www.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/liimapuukasikirja>)
- 5 Blass HJ, Frese M. Failure analysis on timber structures in Germany. Shaker Verlag, 2011
- 6 Steffen Franke, Bettina Franke, Annette M. Harte, Failure modes and reinforcement techniques for timber beams. Bern University of Applied Sciences, College of Engineering and Informatics, National University of Ireland, 2015
- 7 Puurakenteiden halkeilun hallinta, opas. VTT, 2006
- 8 Ruostumattomien terästen mitoituserusteet puurakenteiden liitoksissa, VTT, 2005
- 9 Jobin Jacob & Olga Lucia Barragan, Flexural strengthening of glue laminated timber beams with steel and carbon fiber reinforced polymers. Masters thesis, Chalmers University of technology, Göteborg, 2007
- 10 Kliger R, Johansson M, Crocetti R. Strengthening timber with CFRP or steel plates – short and long-term performance. In: Proceedings of World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, Japan; 2008.
- 11 Pizzo B, Schober KU. On site interventions on decayed beam ends. In: Core document of COST action E34, Bonding of timber, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna; 2008.
- 12 Smedley D, Cruz H, Paula R. Quality control on site. In: Core document of COST action E34, Bonding of timber, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna; 2008.

- 13 Blass HJ, Bejtka I. Reinforcements perpendicular to grain using self-tapping screws. In: Proceedings of 8th World Conference on Timber Engineering, Lahti, Finland; 2004.
- 14 R Sardiko, K Rocens , J Iejavs , V Jakovlevs ja K Ziverts, Analysis of the stiffness and load-bearing capacity of glued laminated timber beams reinforced with strands. Riga technical university, Faculty of building and civil engineering, 2017
- 15 Buan Anshari, Structural behaviour of glue laminated timber beams reinforced by compressed wood. Thesis, University of Liverpool, 2012
- 16 Ville Riikonen, Liimapuupalkkien korjausmenetelmät ja korjaussuunnittelu. Insinööri työ, Metropolia AMK, 2016
- 17 Veli-Matti Kantonen, Liimapuukurakenteiden vauriokartoitus. Opinnäytetyö, Lahden Ammattikorkeakoulu, 2007
- 18 Puurakenteisten hallien kuntotarkastusohjeet, VTT, 2006
- 19 Martin Trautz, Self-tapping screws as reinforcement for timber structures. Aachen University, 2009
- 20 Lada Ilic, Unreinforced and reinforced openings in GLT beams. Master thesis, Graz University of Technology, 2017
- 21 Homevaurioituneen rakennusmateriaalin puhdistusohje rakenneosille, joita ei voida poistaa. Hometalkoot.fi, syyskuu 2013.

Valokuvalähteet

Valokuvalähteet ilmoitettu valokuvan yhteydessä.

Kaikki AutoCad-piirustukset, mitoitukset ja muu ohjelmistoilla tehty työ on tehty Nodetec Oy:n ohjelmistolisensseillä.

Liite 1; Korjausmenetelmien mitoitus, eurokoodi 5:n mukaan

Useassa tilanteessa riippumatta valitusta korjausmenetelmästä, uusi rakenne mitoiteetaan siten, että vaikuttavat voimat siirtyvät kokonaisuudessaan vahvistuksen kautta ehjälle rakenneosalle vaurioituneella alueella. VTT:n tutkimuksen mukaan, esimerkiksi palkin leikkauskapasiteetti halkeaman kohdalla on heikentynyt halkeaman syvyyden verran. Eli jos halkeaman syvyys $\frac{1}{4}$ -osa palkin leveydestä, niin leikkauskapasiteetti on pudonnut $\frac{1}{4}$ -osaa alkuperäisestä. Halkeaman syvyyden arviointi tarkasti on käytännössä mahdollista. Varmalle puolelle päästään mitoittamalla kuormat uusille materiaaleille sekä liittimille ottamatta huomioon puun jäljellä olevaa kapasiteettia.

Lisäksi suunnittelussa otetaan huomioon myös lähtötilanteen aika- ja käyttöluokkakerroin, k_{mod} , eli puun kosteusvaihtelun varmuuskerroin sekä yleinen materiaalin osavarmuuskerroin γ_m joka on Suomessa puumateriaalille 1,3 ja liimapuulle 1,25. Kosteussuhteella ja kosteuden vaihtelulla on selvä vaikutus liimapuun ominaisuuksiin, lujuuteen sekä että jäykkyyteen. Kosteussuhteen vaikutuksen huomioonottamiseksi eurokoodi 5 määrittelee kolme käyttöluokkaa:

- Käyttöluokalla 1 kosteuspitoisuus ei ylitä 12 %, mikä vastaa olosuhteita joissa lämpötila on 20 °C ja suhteellinen kosteus ylittää 65 % vain muutamana viikkona vuodessa. Käyttöluokkaan 1 kuuluu puurakenne, joka on lämmitetyissä sisätiloissa tai vastaavissa kosteusoloissa. Käyttöluokkaan 1 voidaan yleensä lukea myös lämpöeristekerroksessa olevat rakenteet sekä palkit, joiden vetopuoli on lämmöneristeen sisällä. Myös pysyvästi lämmitetyn rakennuksen seinärakenteet jotka on suojattu tiiviillä ja tuuletetulla verhouksella kuuluvat käyttöluokkaan 1. Uimahallien rakenteiden ja ratsastusmaneesien eristettyjen kattorakenteiden katsotaan kuuluvan tähän käyttöluokkaan.
- Käyttöluokalla 2 kosteuspitoisuus ei ylitä 20 %, mikä vastaa olosuhteita joissa lämpötila on 20 °C ja suhteellinen kosteus ylittää 85 % vain muutamana viikkona vuodessa. Käyttöluokkaan 2 kuuluu ulkoilmassa kuivana oleva puurakenne. Rakenteen tulee olla katetussa ja tuuletetussa tilassa sekä alta ja sivuilta hyvin

kastumiselta suojattu. Tähän käyttöluokkaan kuuluvat yleensä esimerkiksi rossi-pohjan ja kylmän ullakkotilan puurakenteet.

Myös ajoittain kylmillään olevien tuuletettujen rakennusten rakenteet joissa ei säilytetä kosteutta muodostavia aineita, kuten kesämökit, lämmittämättömät varastot ja autotallit ja maatalousrakennukset kuuluvat käyttöluokkaan 2. Uimahallien huonosti tuuletettujen rakenteiden, ratsastusmaneesien eristämättömien kattorakenteiden ja maatalousrakennusten rakenteiden katsotaan kuuluvan tähän käyttöluokkaan.

- Käyttöluokalla 3 kosteuspitoisuus ylittää 20 %, eli ne ovat kosteampia kuin käyttöluokassa 2. Käyttöluokkaan 3 kuuluu ulkona säälle alttiina, kosteassa tilassa tai veden välittömän vaikutuksen alaisena oleva puurakenne. Arvioitaessa puurakenteen säilyvyyttä käyttöluokka 3 jaetaan vielä kahteen erilaiseen kosteusaltistumisastetta kuvaavaan alaluokkaan (ks. EN 335-1:2006). Käyttöluokkaan 3 kuuluvat sellaisten tilojen rakenteet, joissa tapahtuvan toiminnan tai varastoinnin seurauksena muodostuu kosteutta.

Puu kestää pitkäkestoista kuormitusta huomattavasti huonommin kuin lyhytaikaista kuormitusta. Ominaislujuuden pieneneminen huomioidaan mitoitusprosessissa kuorman aikaluokkien avulla. Aikaluokat huomioivat käytännössä esiintyvien kuormien ja kuormitustilanteiden erilaiset vaikutusajat. Kuormien jako aikaluokkiin on esitetty kuvassa 29. Kuorman aikaluokan vaikutus huomioidaan kertoimella k_{mod} joka on riippuvainen käyttö- ja aikaluokasta. Yleensä k_{mod} pienentää liimapuun, puun tai muun puumateriaalien lujuutta. Arvot on esitetty kuvassa 30. Jos kuormayhdistelmän kuormat kuuluvat useampaan aikaluokkaan käytetään sitä k_{mod} arvoa joka vastaa lyhintä vaikutusaikaa. Jos liitoksien materiaaleilla on eri k_{mod} -arvot, käytetään näiden keskiarvoa, $k_{mod} = \sqrt{k_{mod,1} \times k_{mod,2}}$ [4].

Eurokoodi 5:ssä ei käsitellä liimaruuviliitoksia. Suomessa liimaruuviliitoksille on käytössä vapaaehtoinen varmennustodistusmenettely. Liimaruuviliitosten varmennustodistuksen arviointiperusteisiin sisältyy, että niitä suunniteltaessa käytetään eurokoodijärjestelmän kanssa yhteensopivia, testaamalla varmennettuja liitoksen suunnitteluohjeita.

Tietyin reunaehdoin voidaan käyttää RIL 205-1-2009 ”Puurakenteiden suunnitteluohje” esitettyä menettelyä. Vaihtoehtoisesti käytettävälle liitostyypille ja käyttötarkoitukselle voidaan laatia tuotekohtainen suunnitteluohje, jossa on esitetty yksittäisen liimatangon- tai ruuvin tartuntalujuus testaamalla.

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

Kuva 29. Liima- ja kertopuun, sahatavaran sekä vanerin lujuuksien k_{mod} -kertoimet eri käyttö- ja aikaluokissa

Materiaali	Käyttö- luokka	Kuorman aikaluokka				
		P	L	M	S	I
Liimapuu, kertopuu, sahatavara	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Vaneri	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

Ominaisuus	Merkintä	Liimapuun lujuusluokka						
		GL20h	GL22h	GL24h	GL26h	GL28h	GL30h	GL32h
Taivutuslujuus	$f_{m,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
Vetolujuus	$f_{t,0,g,k}$	16	17,6	19,2	20,8	22,3	24	25,6
	$f_{t,90,g,k}$	0,5						
Puristuslujuus	$f_{c,0,g,k}$	20	22	24	26	28	30	32
	$f_{c,90,g,k}$	2,5						
Leikkauslujuus	$f_{v,g,k}$	3,5						
	$f_{r,g,k}$	1,2						
Kimmokerroin	$E_{0,g,mean}$	8400	10500	11500	12100	12600	13600	14200
	$E_{0,g,05}$	7000	8800	9600	10100	10500	11300	11800
	$E_{90,g,mean}$	300						
	$E_{90,g,05}$	250						
Liukkerroin	$G_{g,mean}$	650						
	$G_{g,05}$	540						
	$G_{r,g,mean}$	65						
	$G_{r,g,05}$	54						
Tiheys	$\rho_{g,k}$	340	370	385	405	425	430	440
	$\rho_{g,mean}$	370	410	420	445	460	480	490

Kuva 30. Liimapuiden lujuus- ja jäykkyys ominaisuudet EN 14080 mukaan, valmistaja voi määrittää myös oman lujuusluokan tuotteelleen. Lujuusarvot N/mm² ja tiheydet kg/m³.

Ominaisuus	Ominaisarvo	
Taivutuslujuus $f_{m,g,k}$	Taivutuslujuuden ominaisarvo lasketaan yhtälöstä $f_{m,g,k} = -2,2 + 2,5 f_{t,0,l,k}^{0,75} + 1,5 (f_{m,j,k} / 1,4 - f_{t,0,l,k} + 6)^{0,65}$ Yhtälöä sovelletaan vain jos lamellien sormijatkosten ominaislujuus lape-taivutuksessa on $1,4 f_{t,0,l,k} \leq f_{m,j,k} \leq 1,4 f_{t,0,l,k} + 12$ Yhtälöä käytetään myös jatkamattomista lamelleista tehdyn liimapuun lujuudelle jolloin $f_{m,j,k}$ arvona käytetään $f_{m,j,k} = 1,4 f_{t,0,l,k} + 12$	
Vetolujuus	$f_{t,0,g,k}$	Vetolujuuden ominaisarvo on 80 % liimapuun taivutuslujuuden ominaisarvosta $f_{m,g,k}$
	$f_{t,90,g,k}$	0,5
Puristuslujuus	$f_{c,0,g,k}$	Puristuslujuuden ominaisarvo on sama kuin liimapuun taivutuslujuuden ominaisarvo $f_{m,g,k}$
	$f_{c,90,g,k}$	2,5
Leikkauslujuus	$f_{v,g,k}$	3,5
	$f_{r,g,k}$	1,2
Kimmokerroin	$E_{0,g,mean}$	Kimmokertoimen keskiarvo lasketaan yhtälöstä $E_{0,g,mean} = 1,05 E_{t,0,l,mean}$
	$E_{90,g,mean}$	300
Liukkerroin	$G_{g,mean}$	650
	$G_{r,g,mean}$	65
Tiheys	$\rho_{g,k}$	$1,1 \rho_{l,k}$
	$\rho_{g,mean}$	$\rho_{l,mean}$

Kuva 31. Homogeenisen liimapuun ominaislujuudet ja -jäykkyysarvot EN 14080 N/mm² ja tiheydet kg/m³.

Injektiokorjauksen mitoittaminen

Tiedustellessani injektioimenetelmästä useammalta urakoitsijalta sekä epoksi-valmistajalta ja asiaa tutkittuani, lopputulemana on se ettei mistään löydy suoraa kaavaa, jolla laskennallisesti pystytään todistamaan injektointimenetelmän lopputulos. Korjauksen tavoitteena on ennallistaa poikkileikkauspinta-alan lujuusominaisuudet ja kuormankantokapasiteetti. Epoksi ja/ tai muu sideaine jota injektoinnissa käytetään on lujuudeltaan puuta materiaalina kovempaa, siten rakenneosan voidaan olettaa saavuttavan vähintään alkuperäiskapasiteettinsä injektiokorjauksella. Verrattaessa epoksiliimojen lujuusominaisuuksia liimapuuhun, huomataan epoksin olevan materiaalina moninkertaisesti liimapuuta lujempaa. Alla esimerkiksi Axson Technologies:n Epolam 2013 lujuusarvoja valmistajan ilmoituksen mukaan;

Taivutuslujuus	Epolam 2013, 100 MPa. Liimapuu GL30h, 30 MPa, $f_{m,k}$
Vetolujuus	Epolam 2013, 65 MPa Liimapuu GL30h, 24 MPa, $f_{c,0,k}$

Tosiasiassa tilanne on siis täydellisesti riippuvainen työn onnistumisesta ja urakoitsijasta. Kriittiseksi osuudeksi muodostuu miten sideaine kiinnittyy puuhun, ja kiinnittykö se tarvittavan vahvasti jotta voidaan olla varmoja korjauksen onnistumisesta.



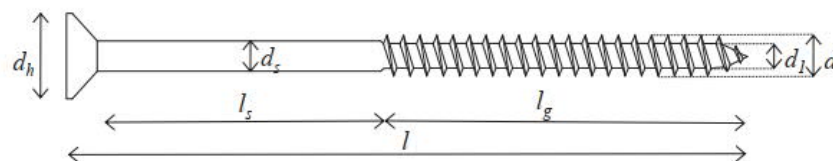
Kuva 32. Epoksi-injektiokorjaus, (Strengthening of glue-laminated timber structures, Freyssinet Group)

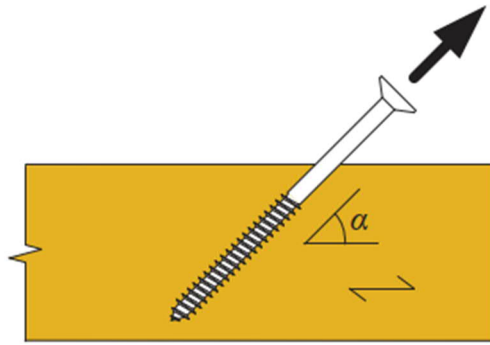
Ruuvien kapasiteetin mitoittaminen

Tässä osiossa on otettu huomioon itseporautuvat ruuvit, joiden nimellispaksuus on 3,8 mm...24 mm. Yli 8 mm halkaisijan ruuveille tulee tehdä esiporaus, reiän halkaisija koko ruuvipituudella tulisi olla $0,5 \dots 0,7d \leq d_i$. Ruuvin kierteisen osan sisähalkaisijan d_i , sydänmitta, tulee olla $0,6d \leq d_i \leq 0,9d$. Mitoittaessa ruuvin kestävyyttä, käytetään halkaisijana tehollista paksuutta $d_{ef} = 1,1d_i$. Ruuvilla tulisi olla EN 14592 standardin mukaisesti määritettynä lujuusominaisuudet;

- vääntökestävyys, $f_{tor,k}$,
- myötömomentti, $M_{y,k}$ tai vetomurtolujuus, $f_{u,k}$,
- ulosvetolujuusparametri, $f_{ax,k}$,
- ruuvin kannan läpivetolujuusparametri, $f_{head,k}$ ja
- vetomurtokestävyys, $f_{tens,k}$.

Kun ruuvin kierteisen osan pituus kärjen puoleisessa puussa on $\geq 8d_{ef}$, ruuviliitoksen leikkauskestävyyttä voidaan korottaa lisäkertoimella 1,15 sillä edellytyksellä, että joko a) kierteisen osan pituus kannan puoleisessa puussa $\geq 6d_{ef}$, b) ruuvin kannan puolella on teräslevy, c) ruuvin kannan alla käytetään aluslevyä pulttiliitosten ohjeiden mukaisesti tai d) ruuvin kannan puolella on vähintään $2d_{ef}$ paksu vaneri-, lastu-, OSB-, tai muu kova levy ja ruuvin kannan halkaisija vähintään $2d$. Tässä kappaleessa esitettyjä kaavoja voidaan käyttää jos ruuvin vetomurtolujuus $f_{u,k} \geq 500 \text{ N/mm}^2$ tai myötömomentti $M_{y,k} \geq 150d_{ef}^{2,6}$. Ruuvin kierteisen osan vaikutus otetaan huomioon käyttämällä kestävyuden laskennassa tehollista halkaisijaa d_{ef} .





Kuva 33. Ruuvien ulosveto, (Aalto yliopisto, Timber engineering, kevät 2020)

Ulosvetolujuusparametri $f_{ax,k}$ pituussuuntaan kuormitettuna voidaan määrittää kaavalla;

$$F_{ax,\alpha,Rk} = \frac{n^{0,9} \times F_{ax,k} \times d \times l_{ef} \times k_d}{1,2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha}$$

missä

$$f_{ax,k} = 0,52 \times d^{-0,5} \times l_{ef}^{-0,1} \times \rho_k^{0,8} [\text{N/mm}^2]$$

$$k_d = \frac{d}{8} \leq 1$$

jossa

$f_{ax,k}$ ruuvien ulosvetolujuusparametrin ominaisarvo kohtisuorassa syysuuntaa vastaan $[\text{N/mm}^2]$

n yhdessä toimivien ruuvien lukumäärä liitoksessa

l_{ef} ruuvien kierteistetyn osuuden tunkeumasyyvyys tarkasteltavassa liitospuussa $[\text{mm}]$

d ruuvien halkaisija $[\text{mm}]$

ρ_k puutavaran ominaistiheys $[\text{kg/m}^3]$

α ruuvien kulma syysuuntaan nähden, kun $\alpha \geq 30^\circ$

Kun $4 \text{ mm} \leq d < 6 \text{ mm}$, voidaan ruuviliitoksen ulosvetokestävyyden ominaisarvo puun syysuuntaan vastaan kohtisuorassa suunnassa laskea kaavalla;

$$F_{ax,90,Rk} = n^{0,9} \frac{d^{1,2} \times l_{ef}^{0,8} \times \rho_k}{20}$$

Ruuviliitoksen läpivetokestävyyden ominaisarvo lasketaan kaavalla;

$$F_{ax,\alpha,Rk} = n^{0,9} \times f_{head,k} \times d_h^2 \times \left(\frac{\rho_k}{\rho_a}\right)$$

jossa

$f_{ax,\alpha,k}$ läpivetokestävyyden ominaisarvo syysuuntaan nähden kulmassa α kun $\alpha \geq 30^\circ$.

$f_{head,k}$ ruuville ilmoitettu EN 14592 mukainen kannan läpivetolujuusparametrin ominaisarvo puun tiheydellä ρ_a

l_{ef} ruuvin kierteistetyin osuuden tunkeumasyvyyden tarkasteltavassa liitospuussa [mm]

d_h ruuvin kannan halkaisija [mm]

Ruuviliitoksen vetolujuuskestävyyden ominaisarvo

$$F_{t,Rk} = n^{0,9} \times f_{tens,k}$$

jossa

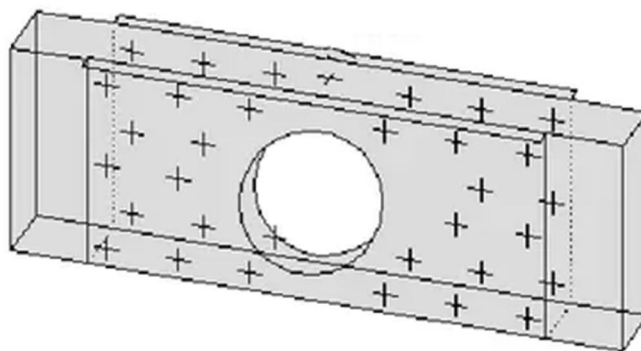
$f_{tens,k}$ on ruuville ilmoitettu EN 14592 mukainen vetomurtokestävyyden ominaisarvo.

Vanerivahvistuksen mitoittaminen

Vaneroinnilla tarkoitetaan periaatteessa menetelmää, jossa rakenneosan kylkiin (palkki) kiinnitetään ruuviliimaamalla vanerivahvistukset. Suunnitellessa vanerointia käytetään lähtökohtana RIL 244-2007 ohjeistusta. Ruuveilla saadaan aikaan liimauksen vaatima puristus, jotta lopputulos on kestävä. Liimaksi valitaan liimatyyppi, jonka täyttöominaisuudet riittävät täyttämään epätasaisuudet poikkileikkauksen pinnoilta. Yleisimmin käytetään rakenteelliseen käyttöön hyväksytyjä epoksi- tai polyuretaaniliimoja.

Ruuviliimaus tehdään useimmiten itseporautuvien ruuvein, joiden halkaisija on 4,0...6,5mm. Kierteistetyn osan tulee ulottua kokonaisuudessaan kärjen puoleiseen puuhun. Kannan puoleisella alueella ei saa olla kierrettä. Ruuvien kanta pitää olla riittävän leveä halkaisijaltaan, jotta aikaan saadaan tarvittava puristusvoima. Ruuvit kiristetään siten, että ruuvien kanta uppoaa puuhun. Ruuvien kärjen tartuntalujuuden täytyy olla suurempi kuin kannan läpivetoalujuus. Ruuvaustiheys valitaan siten, että saadaan aikaiseksi liiman toiminnan kannalta riittävä puristus liitettävien osien välille. Ruuviväli voidaan laskea kaavalla $e_{naula} = 7 \times t$, jossa t on liitettävän vanerin paksuus. Ruuviväli ei kuitenkaan saa ylittää arvoa 150 mm.

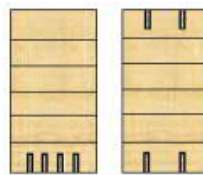
Vanerointimenetelmä vaatii usein ennakkokokeen, jossa koeistetaan kappale jonka sivumitta on 12 x vanerin paksuus. Neljä ruuvia sijoitetaan symmetrisesti siten, että ruuviväli on 7t levyn sivujen suunnassa.



Kuva 34. Vanerointi läpiviennin kohdalla.

Ulkoiset ja / tai sisäiset teräsvahvikkeet

Tässä luvussa on keskitytty teräsvahvikkeisiin. Muitakin materiaaleja on markkinoilla, mutta esimerkiksi Sika Oy:n Carbodur-järjestelmälle (hiilikuituvahvike) ei ole olemassa hyväksyntää kansallisella tasolla kun niitä käytetään liimapuupalkeille. Yksittäisen vahvikkeen kestävyys ratkaiseminen ei ole ongelma, mutta epoksiliimauksen toimivuudesta ei ole näyttöä, siten menetelmästä ei saada tarkkaa. **Kaikkien teräsosien kestävyys tarkistetaan teräsrakenteiden suunnittelustandardin eurokoodi 3:n mukaan.**



Kuva 35. Palkin vahvistukset. (Robert Kliger et al. / Strengthening glulam beams with steel and composite plates, Researchgate.net, 2007)

Teräslevyn murtuminen vetorasituksessa

Teräslevyn vetokestävyys tarkistetaan poikkileikkauksen sekä nettopoikkileikkauksen osalta. Näistä pienempi kestävyysarvo on mitoittava. Koko poikkileikkauksen kestävyys $N_{pl,Rd}$ on

$$N_{pl,Rd} = \frac{f_y \times A}{\gamma M_0}$$

Nettopoikkileikkauksen kestävyys $N_{u,Rd}$ on

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \times f_u \times A_{net}}{\gamma M_2}$$

jossa

f_y	teräksen myötöraja
f_u	teräksen vetomurtolujuus
A	poikkileikkauksen pinta-ala
A_{net}	poikkileikkauksen nettopinta-ala (reikäriivin kohdalla)
γ_{M0}	materiaalin osavarmuusluku, 1,0
γ_{M2}	materiaalin osavarmuusluku vetomurtumisen suhteen, 1,25

Teräslevyn murtuminen puristuksessa

Jos paikallista lommahdusta ei tapahdu, niin teräslevyn kestävä puristava voima $N_{c,Rd}$ on

$$N_{c,Rd} = \frac{f_y \times A}{\gamma_{M0}}$$

jossa

f_y	teräksen myötöraja
A	poikkileikkauksen pinta-ala
γ_{M0}	materiaalin osavarmuusluku, 1,0

Liittimien täyttämien reikien vaikutusta ei tarvitse ottaa huomioon. Lommahdusta ei tarkisteta jos liittimien välinen etäisyys a_1 on pienempi kuin

$$a_1 \leq 9t \times \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

Jos ehto ei täyty, pitää lommahdus tarkistaa. Teräslevyn katsotaan toimivan puristettuna pilarina, jota tarkastellaan Eulerin nurjahdussääntöjen mukaan. Nurjahduspituudeksi oletetaan $0,6 \times a_1$.

Teräslevyn murtuminen taivutuksessa

Jos teräslevy plastisoituu täydellisesti, niin poikkileikkauksen kestävä taivutusmomentti $M_{c,Rd}$ on

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} \times f_y}{\gamma_{M0}}$$

jossa

W_{pl}	teräslevyn plastinen taivutusvastus
f_y	teräksen myötöraja
γ_{M0}	materiaalin osavarmuusluku, 1,0

Teräslevyn plastinen taivutusvastus määritellään täysin plastisoituneen poikkileikkauksen kestävyuden avulla

$$M_{Pl} = W_{Pl} \times f_y$$

Suorakulmaisen poikkileikkauksen kestävä taivutusmomentti on

$$M_{Pl} = 2 \times f_y \times b \frac{h}{2} \times \frac{h}{4} = \frac{f_y \times bh^2}{4}$$

jossa

h poikkileikkauksen korkeus
b poikkileikkauksen leveys

taivutusvastuksen yhtälöistä saadaan

$$W_{Pl} = \frac{bh^2}{4}$$

Vedetyllä alueella sijaitsevien reikien vaikutusta ei tarvitse ottaa huomioon jos seuraava ehto täyttyy

$$\frac{A_{net} \times f_u \times 0,9}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}}$$

jossa

f_y teräksen myötöraja
 f_u teräksen vetomurtolujuus
A poikkileikkauksen pinta-ala
 A_{net} poikkileikkauksen nettopinta-ala (reikärivin kohdalla)
 γ_{M0} materiaalin osavarmuusluku, 1,0
 γ_{M2} materiaalin osavarmuusluku vetomurtumisen suhteen, 1,25

Liittimien täyttämien reikien vaikutusta ei tarvitse ottaa huomioon puristusjännitysten rasi-
sittamassa poikkileikkauksen osassa.

Leikkauskestävyys

Teräslevyn leikkauskestävyys lasketaan yhtälöstä

$$V_{c,Rd} = V_{pl} = \frac{A_v(f_y/\sqrt{3})}{\gamma M_0}$$

jossa

f_y	teräksen myötöraja
A_v	poikkileikkauksen leikkausrasitettu pinta-ala
γ_{M_0}	materiaalin osavarmuusluku, 1,0

Jännitysten yhteisvaikutus

Kun teräslevyä rasittavat samanaikaiset normaalivoimat ja leikkausvoimat, käytetään mitoitusehto

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma M_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma M_0}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma M_0}\right) \times \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma M_0}\right) + 3 \times \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma M_0}\right) \leq 1$$

jossa

$\sigma_{x,Ed}$	pitusuuntaisen normaalijännityksen mitoitusarvo
$\sigma_{z,Ed}$	poikisuuntaisen normaalijännityksen mitoitusarvo
T_{Ed}	leikkausjännityksen mitoitusarvo
f_y	teräksen myötöraja
γ_{M_0}	materiaalin osavarmuusluku, 1,0

Yllä esitetty, yksinkertaistettu ehto on varmalla puolella, koska se ei pelkästään ota huomioon plastisoitumisen suotuisia vaikutuksia. Teräslevyn kestävyys voidaan arvioida realistisesti käyttämällä vaikuttavien voimasuureiden (N, V, M) vuorovaikutusyhtälöitä. Yhtälöitä voidaan soveltaa myös esiporattuihin levyihin, jos käytetään poikkileikkauksen nettopinta-ala ja taivutusvastuksen nettoarvoa.

Teräsosan mitoituksen lisäksi ulkoisen vahvikkeen tarkastelussa tulee ottaa huomioon myös kiinnikkeen kestävyys. Kiinnikkeiden kestävyden tarkastelu tehdään EN 1995-1-1 ohjeiden mukaan, riippuen käytetäänkö vahvikkeita yhdellä, kahdella tai useammalla rakenneosan pinnalla.

Proteesi ja proteesin liitos

Kantavan rakenteen proteesiliitos tehdään useimmiten liimatankoliitoksena, jossa tanko on terästä. Muita mahdollisia tankomateriaaleja ovat mm. lasikuitu (GFRP), erilaiset komposiitit, sekä hiilikuitu. Liimatankoliitoksia tehdään usein vain tehtaissa, ja niiden tekeminen edellyttää vaatimuksenmukaisuustodistusta tehtaan laadunvarmentamismenetelmästä (AC-luokka 1). Liimat, valmistustekniikat ja laadunvarmistusmenettelyt pitää olla hyväksytyt. RIL ei ota kantaa voisiko tätä liitosmetodia käyttää myös työmaaolosuhteissa, itse näkisin sen mahdollisena sillä tehdäänhän injektointejakin työmaaolosuhteissa. Liitokset tulee suunnitella EN 1995-1-1 mukaisesti.

Vedettyjen tankojen tai profiilien mitoituksessa voidaan käyttää käytetyn materiaalin vetomurtolujuutta. Suurempaa arvoa kuin $f_{u,k} = 800 \text{ N/mm}^2$ ei pitäisi käyttää. Puristettujen tankojen mitoituksessa käytetään valitun materiaalin myötölujuutta tai 0,2-ajan minimiarvoa f_y . Tartuntakapasiteettia määrittäessä, tartuntapinta lasketaan poratun reiän halkaisijan mukaan, edellyttäen että se on enintään 1,25 x tangon halkaisija. Kun suuntakulma on $\alpha \geq 15^\circ$ syysuuntaan nähden, liimasauman ominaistartuntalujuus lasketaan kaavasta:

$$f_{a,k} = 6,5 \times \left(1 - \frac{L_a}{100d}\right) \text{ N/mm}^2$$

jossa

d tangon paksuus (halkaisija)
L_a tartunta pituus puussa

Syysuuntaan liimatuilla, vedetyillä tangoilla ylläoleva kaava kerrotaan varmuusluvulla 0,75. Käyttöluokan 2 rakenteilla pienennetään syysuuntaista tartuntalujuutta vielä 20%. Väliarvot interpoloidaan suoraviivaisesti. Tartuntalujuuden määrittämisessä tulee käyttää puuosan k_{mod} kerrointa sekä osavarmuuslukua $\gamma M0$.

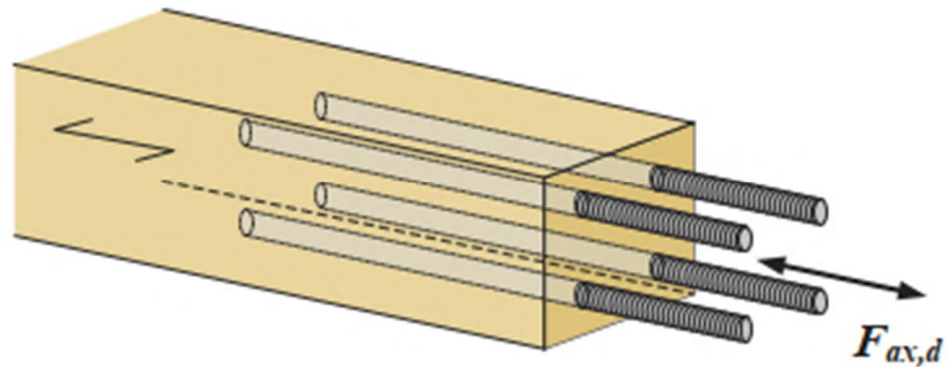
Liitos toimii siten, että vedetyt tangot myötäävät. Siksi tartuntapituuksien tulee olla niin pitkiä, että mitoittavan aikaluokan tartuntakestävyyden mitoitusarvoa $R_{a,d}$ vastaava tangon vetojännitys $\sigma_{s,t,d}$ täyttää ehdon:

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

jossa
 f_y

myötölujuus tai 0,2-rajan minimiarvo

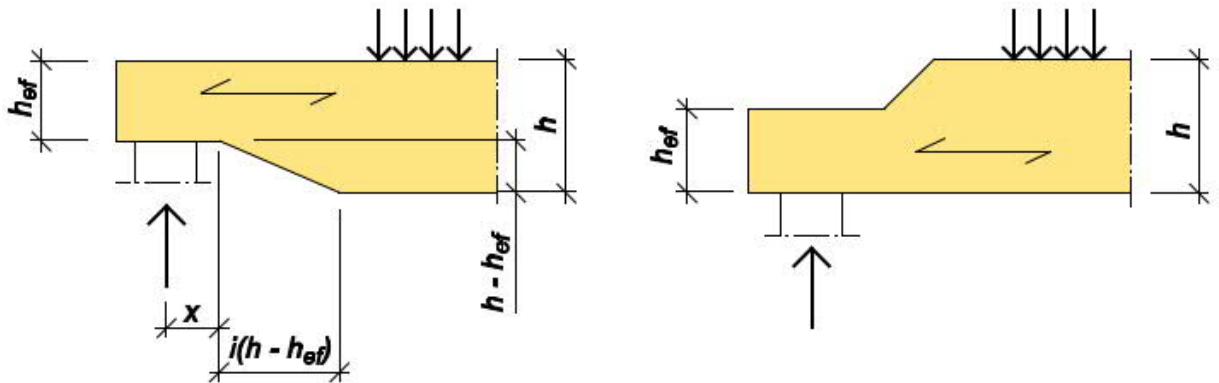
Leikkausrasitettujen liitosten mitoituksessa käytetään leikkausrasitetuille pulttiliitoksille annettuja ohjeita. Puun kosteus liimaushetkellä saa olla enintään 3%-yksikköä suurempi kuin rakenteen alin suunniteltu kosteuspitoisuus. Eli jos korjausmenetelmää suunnitellaan kosteusvauriosta kärsineelle rakenneosalle, tulee se ensin kuivattaa.



Kuva 36. Liimatanko, (Aalto yliopisto, Timber engineering, kevät 2020)

Rei'itetyn, lovetun tai kaarevan palkin vahvistus

Tässä luvussa esitettyjen vahvistusmenetelmien lähtökohtana on se, että valittu vahvike siirtää kuorman itse kokonaisuudessaan kohdan 6.4 mukaista mitoitusarvoa hyväksi käyttäen. Paikallisen heikennyksen, loveuksen tai muodosta johtuvan lisärasituksen alueella vaikuttava voima voidaan laskea alla esitetyin kaavoin. Useimmiten rakenneosat joita tässä luvussa käsitellään, ovat jo vahvistettuja. Aina vahvistaminen ei kuitenkaan ole riittävä, tai se on jäänyt tekemättä.



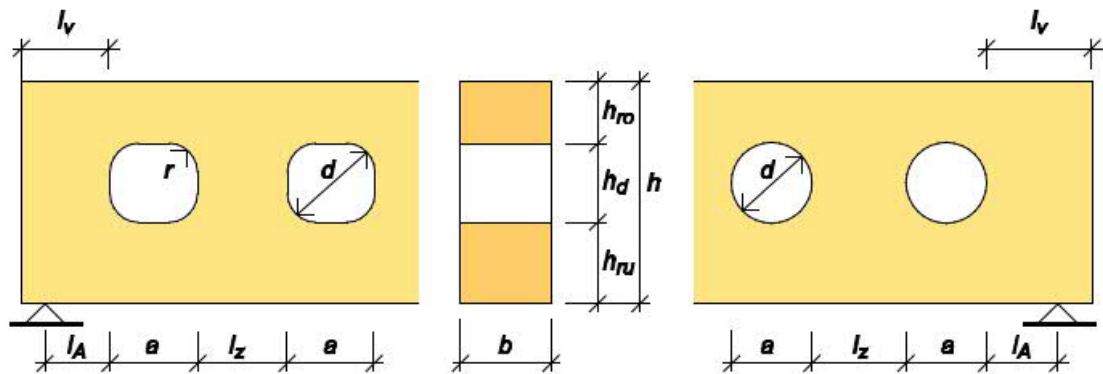
Kuva 37. Päästään lovettu palkki. (Liimapuukäsikirja 2)

Vaikuttava voima lovetussa palkissa lasketaan kaavalla:

$$F_{t,90,d} = 1,3 \times V_d \times [3(1 - \alpha^2) - 2 \times (1 - \alpha^3)]$$

jossa
 V_d
 α

leikkausvoiman mitoitusarvo loveuksen vaikutusalueella
 lovetun ja normaalin poikkipinta-alan korkeuden suhde.



Kuva 38. Rei'itetty palkki. (Liimapuukäsikirja 2)

Rei'itetyn palkin (pyöreä tai neliskulma) vaikuttavat voimat,

$$F_{t,90,d} = \frac{V_d \times h_d}{4h} \left[3 - \frac{h_d^2}{h^2} \right] + 0,008 \times \frac{M_d}{h_r}$$

jossa

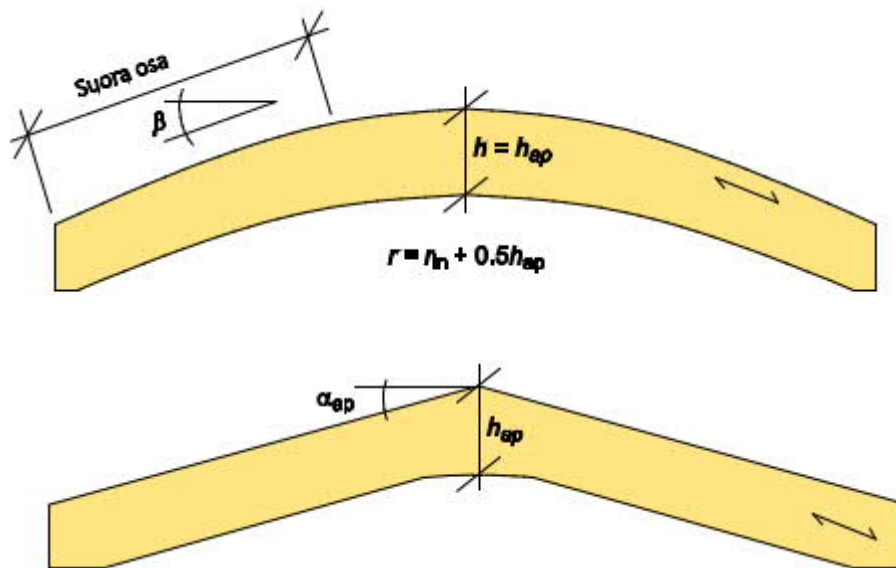
V_d/M_d

h

h_d

h_r

momentin ja leikkausvoiman mitoitusarvo
poikkileikkauksen korkeus
aukon korkeus poikkileikkauksessa
aukon etäisyys palkin ala- tai yläpinnasta



Kuva 39. Kaareva palkki ja harjapalkki. (Liimapuukäsikirja 2)

Kaarevan- tai harjapalkin suurimmat vetojännitykset poikkisuoraan syytä sijaitsevat rakenneosan harja-alueella. Paikallinen vahvistus voidaan mitoittaa käyttäen kaavaa;

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \times \frac{6 M_{ap,d}}{b \times h_{ap}^2}$$

jossa

$M_{ap,d}$

h_{ap}

k_p

momentin arvo harjalla

harjan korkeus

kulmakerroin