

LIIMAPUURAKENTEIDEN

VAURIOKARTOITUS

Vaurioiden luonne, yleisyys ja korjausmenetelmät

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Puutekniikan koulutusohjelma
Puurakennetekniikka
Opinnäytetyö
Kevät 2007
Kantonen Veli-Matti

Lahden ammattikorkeakoulu
Puutekniikan koulutusohjelma

KANTONEN, VELI-MATTI:

Liimapuurakenteiden vauriokartoitus
Vaurioiden luonne, yleisyys ja
korjausmenetelmät

Puurakennetekniikan opinnäytetyö, 71 sivua, 3 liitesivua

Kevät 2007

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on tutkia kantavien liimapuurakenteiden tyypillisimpiä vaurioita, niiden yleisyyttä ja luonnetta sekä mahdollisia korjausmenetelmiä.

Teoriaosuudessa käsitellään puurakentamista yleisesti sekä esitellään liimapuun valmistusprosessi. Liimapuurakenteiden tuntemiseksi teoriassa käsitellään myös laskennallinen tarkastelu ja esitellään yleisimpiä kantavia liimapuurakennejärjestelmiä. Teoria sisältää lisäksi tutkimuksen, jossa selvitetään liimapuurakenteiden osuus Suomessa tapahtuneiden kantavien rakenteiden sortumisista ja onnettomuuksien vaaratilanteista.

Tutkimuksessa keskitytään kohteiden silmämääräiseen vaurioanalyysiin. Vauriotaso selvitetään kirjallisuuden avulla. Kohteet on valittu Päijät-Hämeen seudulta. Kohteiden valintoihin vaikuttivat rakenteiden runkojärjestelmät, iät ja vauriotasot.

Tutkimuksen tulokset osoittavat liimapuun olevan erittäin toimiva ja turvallinen vaihtoehto muille rakennusmateriaaleille. Liimapuurakenteista saadaan toimivat ja turvalliset työmaalla sekä tehtaalla tehtävän tarkan suunnittelun ja laadunvalvonnan seurauksena. Julkisuudessa lisääntyneet onnettomuudet ja sortumiset ovat pääasiassa johtuneet suunnitteluvirheistä ja kiireellisistä aikatauluista.

Avainsanat: liimapuu, liimapuurakenne, sortuminen, vaurio, korjausmenetelmä

Lahti University of Applied Sciences
Faculty of Technology

KANTONEN, VELI-MATTI: Damages of gluelam beams
Damage classification, frequency and
repair methods

Bachelor's thesis in wood technology, 71 pages, 3 appendices

Spring 2007

ABSTRACT

The objective of this study was to examine typical damages of gluelam beams. The study shows how common damages are and classifies them. Damages repair methods were also investigated.

The theory part deals with wood construction in Finland and describes the manufacturing process of gluelam. Because gluelam constructions are very variable, it is important to present calculations of dimensioning gluelam constructions. The theory part also includes information of typical gluelam construction systems. To support the main study, the theory section examines collapses and dangerous situations caused by accidents which have happened in Finland. The study shows the role of gluelam constructions in these incidents.

The empirical study contains analysis of research objects. The objects were chosen on the basis of age, gluelam construction systems and level of damage. All objects are from the Lahti area. The cases were documented with a digital camera. The analysis was based on information from literature.

The study results indicated that gluelam is a very practical and safe option compared to other construction materials. The main point is that quality control and designing methods have to be on an excellent level for gluelam construction to be functional and safe. Lack of quality control, too tight schedules and wrong designing methods have caused increasing problems and accidents in Finland.

Keywords: gluelam, gluelam construction, collapse, damage, repair method

SISÄLLYS

| | | |
|-------|-------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | JOHDANTO | 1 |
| 2 | YLEISTÄ PUURAKENTAMISESTA | 2 |
| 2.1 | Puun käyttö rakennusmateriaalina | 2 |
| 2.2 | Puurakentamisen lähihistoria ja tulevaisuus | 3 |
| 3 | LIIMAPUU | 3 |
| 3.1 | Liimapuu rakennemateriaalina | 3 |
| 3.1.1 | Liimapuun rakenne | 5 |
| 3.1.2 | Valmistusprosessi | 6 |
| 3.1.3 | Lujuusluokat ja laadunvalvonta | 7 |
| 3.2 | Liimapuurakenteiden käyttökohteet | 8 |
| 3.3 | Runkojärjestelmät | 9 |
| 3.3.1 | Pilari-palkkijärjestelmä | 10 |
| 3.3.2 | Jatkuvat palkit | 11 |
| 3.3.3 | Ristikot | 11 |
| 3.3.4 | Kolminivelkattotuolit | 12 |
| 3.3.5 | Kaaret | 13 |
| 3.3.6 | Kehärunkorakenteet | 14 |
| 3.3.7 | Ulokkeet ja arinat | 15 |
| 4 | LIIMAPUURAKENTEIDEN LASKENNALLINEN TARKASTELU | 16 |
| 4.1 | Mitoitusmenetelmiä | 17 |
| 4.2 | Liimapuun mitoituksen erityispiirteet | 21 |
| 4.3 | Tasakorkean liimapuupalkin mitoitus esimerkki Eurocode 5:n mukaan | 24 |
| 5 | LIIMAPUURAKENTEIDEN VAURIOKARTOITUS | 29 |
| 5.1 | Liimapuurakenteiden vaurioita | 30 |
| 5.2 | Liimapuurakenteiden tyypillisimmät vauriot | 34 |
| 5.2.1 | Liimapuurakenteissa esiintyvien halkeamien syyt | 34 |
| 5.2.2 | Halkeamien vaarallisuus | 40 |
| 5.2.3 | Vaaralliset vauriokohdat kannatintyypeittäin | 42 |

| | | |
|--------|----------------------------------------------------------|----|
| 6 | KORJAUSMENETELMÄT | 43 |
| 6.1 | Korjaustarpeen arviointi ja ajankohdat | 43 |
| 6.2 | Korjausmenetelmät | 44 |
| 6.3 | Virheelliset korjausmenetelmät | 47 |
| 7. | LIIMAPUURAKENNEKOHTEIDEN VAURIOANALYYSI | 48 |
| 7.1 | Liimapuurakenteiden analysoinnin tarkoitus ja tavoitteet | 48 |
| 7.2 | Tutkimuksen suorittaminen ja kuvauskohteiden valinta | 48 |
| 7.2.1 | ABC – Liikennemyymälä, Nastola | 49 |
| 7.2.2 | Kunnan kirjasto, Hartola | 50 |
| 7.2.3 | K-Rauta, Lahti | 51 |
| 7.2.4 | Lahden Mittaovi Oy, Nastola | 52 |
| 7.2.5 | Olavin toimintakeskus, Sysmä | 54 |
| 7.2.6 | S- Market Ankkuri, Lahti | 55 |
| 7.2.7 | S-Market Hennala, Lahti | 55 |
| 7.2.8 | S-Market, Hollola | 56 |
| 7.2.9 | Stemma – myymälä, Lahti | 60 |
| 7.2.10 | K-Market Suvituuli, Sysmä | 61 |
| 7.2.11 | Unikulma, Lahti | 62 |
| 7.3 | Yhteenveto tutkimuskohteiden vauriokartoituksesta | 64 |
| 8 | YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET | 66 |
| | LÄHTEET | 68 |

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia kantavien liimapuurakenteiden tyypillisimpiä vaurioita, niiden yleisyyttä ja luonnetta sekä mahdollisia korjausmenetelmiä. Työssä käsitellään myös liimapuun valmistusta ja rakentamista sekä perehdytään liimapuurakennelmien lujuuslaskentaan. Työn valmistumisessa apuna toimi Lahden ammattikorkeakoulun valvova opettaja Toivo Koistinen.

Idea tähän työhön syntyi nykyisten kantavien rakenteiden onnettomuuksien lisääntymisestä. Rakenteiden sortumiset ovat saaneet julkisuudessa kasvavaa huomiota, minkä vuoksi ihmisten huoli rakentamisen tasosta on tänä päivänä lisääntynyt. Samalla myös epätietoisuus on kasvanut, ihmiset ovat käyneet kriittisimmiksi nykyajan rakentamiskulttuuria kohtaan.

Keskeisimpänä ideana on selvittää liimapuurakenteiden osuus julkisuuteen päässeiden kantavien rakenteiden onnettomuuksista ja tuoda esille, mitkä ovat olleet syinä näihin tapauksiin. Samalla selvitetään myös, onko liimapuurakentaminen todellisuudessa niin huonoa kuin yleisesti luullaan ja ovatko kaikki rakenteissa havaittavat vauriot haitallisia. Yleisesti liimapuu saattaa sisältää kuivumis- ja ripustusliitoshalkeamia sekä kosteusvaurioita. Tutkimusosan kohteiden avulla tarkastellaan liimapuurakenteissa havaittavia vaurioita.

Tutkimuksessa on kuvattu esimerkkikohteita, joissa on käytetty liimapuurakenteita. Kohteista osa on valittu sattumanvaraisesti ja osa kohteissa esiintyvien vaurioiden vuoksi. Kohteiden rakenteet dokumentoitiin kuvaamalla, ja vaurioiden analysoinnissa käytettiin apuna kirjallisuutta.

2 YLEISTÄ PUURAKENTAMISESTA

2.1 Puun käyttö rakennusmateriaalina

Puu on ollut aikojen kuluessa hyvin luonteva ja luotettava materiaali rakentamiskulttuurissa. Puun suosio pohjautuu hyvin ilmiselviin ominaisuuksiin. Puu on vähän tuotantoenergiaa sisältävä, ekologinen, terveellinen ja uusiutuva luonnonvara. Puun monipuolista käyttöä on edistänyt sen soveltuvuus eri käyttötarkoituksiin sekä kantavana rakenteena että verhousmateriaalina. Teollisissa prosesseissa on opittu hyödyntämään puun ominaisuuksia, sitä kautta puun käyttö materiaalina on tehnyt siitä entistä suosittumman. (Siikanen 1995, 3,7.)

Ihmiset kokevat puun miellyttäväksi materiaaliksi teollisen käytön lisäksi myös sen luonnonläheisyyden vuoksi. Puun pinta on miellyttävä ja lämmin. Tunne puun lämpöisyydestä johtuu sen fysikaalisista ominaisuuksista. Puulajien väliset värierot ja tekstuuriset vaihtelevuudet kasvattavat entisestään puun suosiota ja monipuolisia käyttömahdollisuuksia. Puulla on kuitenkin muutamia käyttöä rajoittavia ominaisuuksia, jotka käyttäjien ja suunnittelijoiden tulee ottaa huomioon. Näitä ovat suuri kosteuseläminen, palavuus, lahoamisalttius ja anisotrooppisuus, joka tarkoittaa, että sen materiaaliominaisuudet ovat hyvin erilaiset puun syiden suuntaan kuin poikittain syitä vastaan. (Siikanen 1998, 11–12.)

Oikein huollettuna ja asianmukaisesti suunniteltuna puu on pitkäaikainen materiaali, jonka korjausmenetelmät ja ulkoiset ehostukset ovat verrattain helposti toteutettavissa. Tähän lisättynä suomalaisten mieltymys asua pientaloissa kasvattaa puun suosiota entisestään.

2.2 Puurakentamisen lähihistoria ja tulevaisuus

Suomella on pitkät perinteet puurakentamisessa. Rakennusmateriaalina puu säilytti asemansa aina 1950-luvun lopulle, jolloin puu joutui antamaan tilaa muille rakennusmateriaaleille. Näitä materiaaleja olivat teräs, betoni, kevytbetoni ja tiili. Tiukka palolainsäädäntö ja kerrostalovaltaisuus olivat lähinnä syynä vaihtoehtoisten rakennusmateriaalien yleistymiseen. 1970-luvun lopulta puun suosio on lisääntynyt, nykyisin yli 90 % omakotitaloista sekä 80 % rivitaloista on puurunkoisia. Asuinrakennusten lisäksi puu on suosittu muun muassa maatalouden ja teollisuuden rakennuksissa sekä myymäläliikkeiden rakennuksissa. (Siikanen 1998, 20 – 22.)

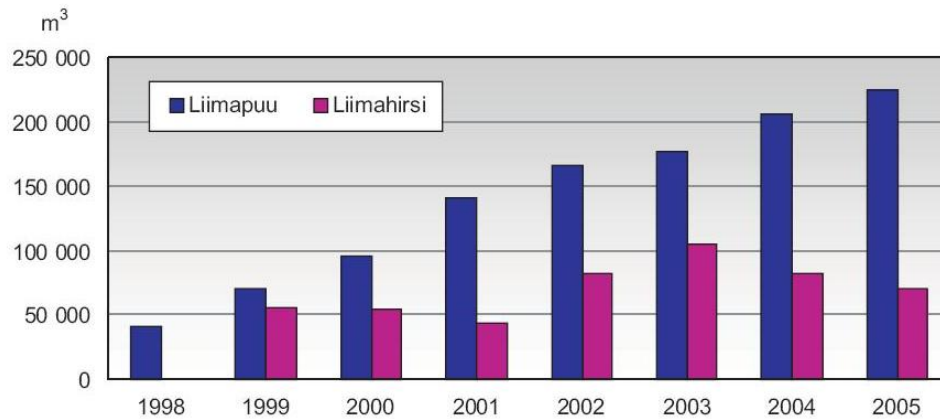
Suomen palolainsäädännön uusiuduttua puun käyttö rakennusmateriaalina suurissa ja monikerroksisissa rakennuksissa tulee lisääntymään. Puusta voidaankin olettaa muodostuvan hyvin hallitseva materiaali omakotitalojen lisäksi myös 1-kerroksisissa halleissa ja myös 3 - 4-kerroksisien asuinrakennusten runkona. Puun kohtelu tasavertaisempana rakennusmateriaalina on saavuttanut sille kilpailukykyisemmän aseman muiden materiaalien joukossa. Lisäksi puurakentamisen suunnittelun ja toteutuksen tason nostattaminen on edistänyt suomalaista puurakentamista kansainvälisesti positiiviseen suuntaan. (Siikanen 1995, 11.)

3 LIIMAPUU

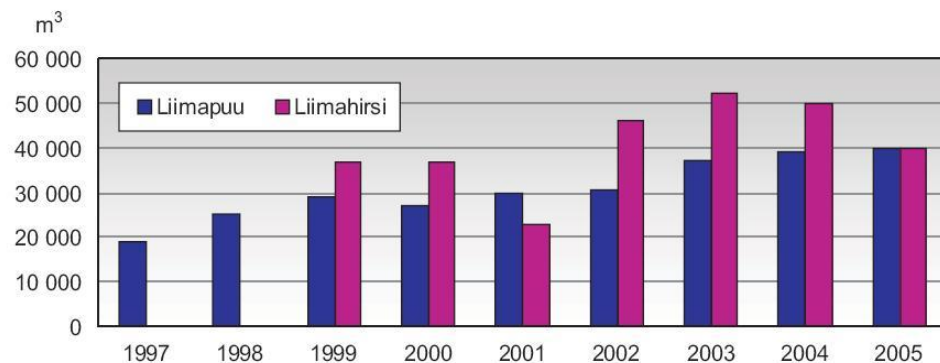
3.1 Liimapuu rakennemateriaalina

1800-luvun lopulla aloitettiin liimapuutekniikan kehitys Saksassa. Suomeen tekniikka tuli Norjan kautta 1900-luvun alussa. Kantavissa runkorakenteissa liimapuuta on käytetty 1950-luvun puolivälistä lähtien. Aluksi liimapuun tuotanto oli hyvin vaatimatonta, mutta myöhemmin tuotanto on jatkuvasti lisääntynyt. (Liimapuu - käsikirja 2003, 9.)

Vuonna 2005 liimapuutuotanto Suomessa oli Liimapuu yhdistys ry:n keräämien tietojen mukaan 225 000 m³ ja toimitus kotimaahan 40 000 m³, kuten kuvioista 1 ja 2 voidaan todeta (Aravuo 2006, 18 ja 33).



KUVIO 1. Liimapuutuotanto Suomessa vuosina 1998–2005 (Aravuo 2006, 33.)



KUVIO 2. Liimapuun toimitus kotimaahan vuosina 1997–2005 (Aravuo 2006, 18.)

Liimapuussa optimoidaan puumateriaalille tutut hyvät ominaisuudet, tällöin mahdollistetaan liimapuulle ominaisuudet, jotka muilta rakennusmateriaaleilta puuttuvat. Puumateriaalin lujuusominaisuuksien yhdistäminen nykyaikaiseen liimaustekniikkaan tekevät liimapuusta korkealuokkaisen rakennusmateriaalin.

Liimapuulla pystytään tyydyttämään nykyajan erittäin korkeita rakenteellisen vaatimustason tarpeita ja tuomaan esille ominaisuuksia, jotka tekevät siitä tehokkaan rakennusmateriaalin, joihin kuuluvat

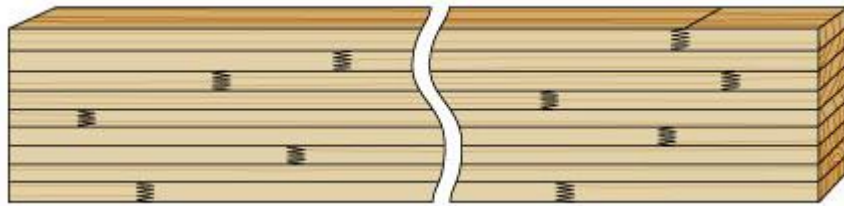
- hyvä palonkestävyys
- miellyttävä ulkonäkö niin ulko- kuin sisätiloissakin
- lujuus ja jäykkyys ominaisuudet suhteessa omaan painoon
- lämmöneristämisominaisuudet, jotka vähentävät kylmäsiltoja ja kondenssivaaraa
- hyvä säilyvyys kemiallisesti aggressiivisessa ympäristössä
- pienen omanpainon ansiosta kuljetus- ja asennuskustannukset ovat alhaisemmat
- joustava tuotanto
- pienet valmistustoleranssit ja hyvä mittatarkkuus normaaleissa lämpö- ja kosteus olosuhteissa.

Liimapuun valmistus vaatii vähän energiaa, eikä sen luonnon kiertokulkuun palauttaminen aiheuta ympäristölle haittavaikutuksia. Lisäksi liimapuunrakenteiden esivalmistuskokonaisuuksien johdosta asentaminen on nopeaa ja yksinkertaista. (Liimapuu - käsikirja 2003, 8-9.)

3.1.1 Liimapuun rakenne

Liimapuu koostuu neljästä tai useammasta lamellista, joiden syysuunta on pituusakselin suuntainen ja jotka ovat liimaamalla koottu yhdeksi puurakenteeksi. Lamellien määrän ollessa pienempi kuin neljä on puurakenteiden suunnittelussa sovellettava sahatavaralle annettuja ohjeita. Liimapuun rakenteellisen leveyden kasvattamiseksi voi lamellilautoja liimata vierekkäin ja pituuden kasvattaminen toteutetaan lamelleissa sormijatkamisella. Raaka-aineena liimapuussa käytetään

pääsääntöisesti kuusta, mutta myös männyn käyttö on mahdollista. Liimaukseen käytetään tavallisesti resorsinolifenoliformaldehydiliimaa, mutta käyttötilan ollessa esimerkiksi ulkona on käytettävä säänkestäviä liimoja. (Siikanen 2001, 33.) Melamiini-liimat kuuluvat nykyään myös säänkestäviin liimoihin, niitä käytetäänkin yhä enemmän (Liimapuu - käsikirja 2003, 15).



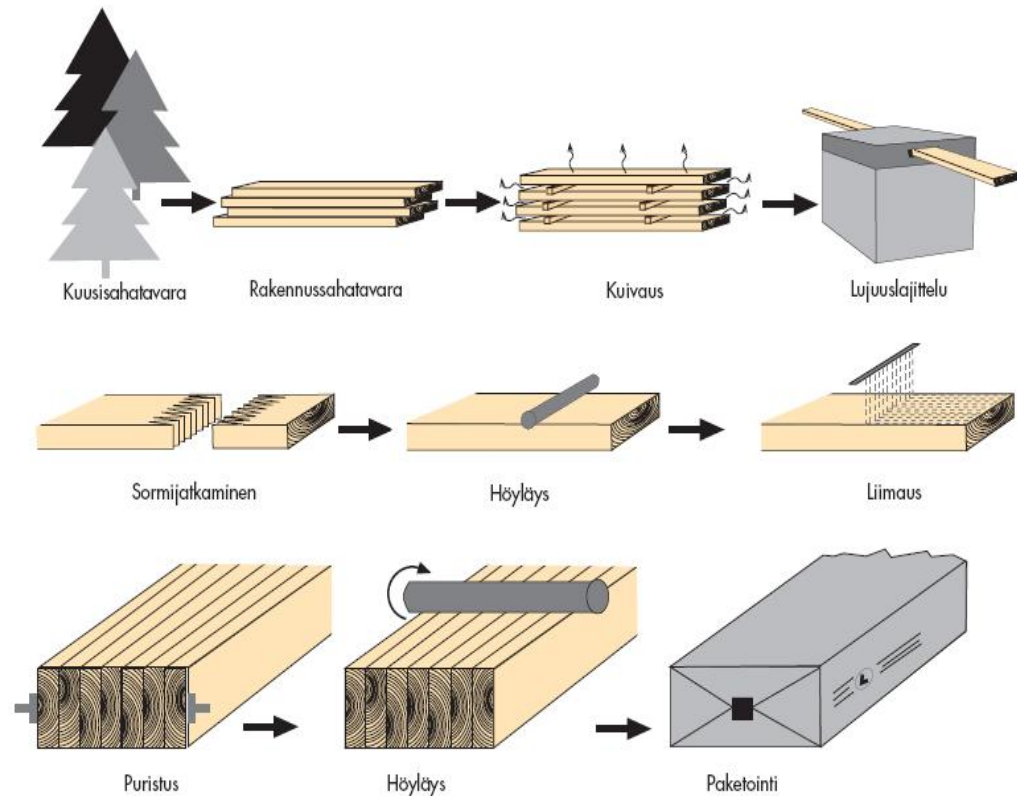
KUVIO 3. Liimapuun rakenne (Insinööripuutuotteet, 2007.)

3.1.2 Valmistusprosessi

Liimapuun valmistaminen suoritetaan melkein samalla tavalla maasta tai tehtaasta riippumatta. Liimapuun valmistaminen alkaa sahatavaran kuivauksella. Kosteuden on oltava alle 15 %. Liittyvien lamellien kosteus saa poiketa korkeintaan 4 % toisistaan, jotta liimasauman lujuus on parempi. Kosteuden tulee olla myös riittävän lähellä tulevaa tasapainoarvoa, jotta välttyttäisiin häiritsevältä halkeamanmuodostumiselta. Valmistus jatkuu tämän jälkeen lujuuslajittelulla, lamellit tulee lajitella samaan lujuusluokkaan, näin mahdollistetaan homogeeninen liimapuu. (Liimapuu - käsikirja 2003, 11.) Sormijatkamisella puutavara yhdistetään lamelleiksi liiman ja puristuskitkan avulla, jolloin saadaan niin sanottu jatkuva lamelli. Kun haluttu pituus on valmistunut, katkaistaan lamellit sopivan pituisiksi ja välivarastoidaan kuivumista varten. Lamellien työstö jatkuu liimattavien pintojen epätasaisuuksien höyläämisellä ja liimauksella. Kun pinnat on saatu liimattua, ne puristetaan $0,4\text{--}1,2\text{ N/mm}^2$ paineessa. Puristusaine kasvaa palkkien kaareutuessa ja lehtipuiden puristuksessa. Liimauksen vakioolosuhteisiin kuuluu lämpötila $+20\text{ °C}$ ja suhteellinen kostus 65 %. (Puurakenteet STEP 1 1996, A8/1-A8/2.)

Palkkien kuivuttua vähintään kuusi tuntia ne irrotetaan puristimista ja niiden sivut höylätään pintojen tasaamiseksi ja liimapurseiden poistamiseksi. Tässä vaiheessa tehdään myös muut käsittelyt ja esityöt, jotka on kannattavaa tehdä valvotuissa olosuhteissa, sekä dokumentoidaan tuotteen laatuun liittyvät olosuhteet.

(Puurakenteet STEP 1 1996, A8/3.)



KUVIO 4. Liimapuun valmistusprosessi (Liimapuu - käsikirja 2003, 11.)

3.1.3 Lujuusluokat ja laadunvalvonta

Kansallisten ja eurooppalaisten normien mukaan valmistetut liimapuut kuuluvat tiettyihin lujuusluokkiin. Lujuusluokituksen määrittely tapahtuu poikkileikkauksessa käytetyn puutavaran lujuden ja sijainnin mukaan. Suomessa ja muissa Pohjoismaissa liimapuu valmistetaan yleensä lujuusluokkaan L40, joka vastaa eurocode 5 -esinormin (ENV 1995) kansallisen sovellusohjeen mukaan GL32. Normeista poikkeavaa liimapuuta saa käyttää kantavana rakenteena, vain jos se on tyyppihyväksytty.

Liimapuulla on pääasiassa samat lujuuteen liittyvät ominaisuudet kuin tavallisellakin rakennepuutavaralla: anisotrooppisuus, lujuuden heikentyminen kosteuden ja kuormituksen kasvaessa ja heterogeenisyys sekä materiaaliominaisuuksien suuri vaihtelu. (Liimapuu - käsikirja 2003, 13–14.)

Liimapuun valmistuksessa on monta työvaihetta, jotka vaativat suurta tarkkuutta, esimerkiksi sormijatkosten jyrsiminen, liimanvalmistus ja levitys sekä puristukseen liittyvät toimenpiteet. Tuotannon laadun tasaisena ja korkeana pysymisen varmistamiseksi on valmistajan suoritettava jatkuvaa laadunvalvontaa. Laatujärjestelmän täytyy olla erityisen sertifiointilaitoksen hyväksymä. Pohjoismaissa valmistettu ja kontrolloitu liimapuu merkitään L-merkillä, lisäksi jokaiseen liimapuuelementtiin merkitään valmistajan nimi tai tunniste, lujuusluokka, liimausluokka, valmistustunniste ja – standardi. Kuviosta 5 nähdään Vierumäen teollisuus Oy:n merkintäkyltti. (Liimapuu - käsikirja 2003, 15.)



KUVIO 5. Vierumäen teollisuus Oy:n merkintäkyltti

3.2 Liimapuurakenteiden käyttökohteet

Kantaville liimapuurakenteille löytyy monia käyttökohteita, erityisesti ne sopivat kohteisiin, joissa vaaditaan pitkiä jännevälejä ja kaunista arkkitehtonista ilmettä. Edellä mainittuja ominaisuuksia (ks. 3.1) on hyödynnetty monissa kohteissa, esimerkiksi teollisuus- ja varastorakentamisessa, urheilurakentamisessa, vapaa-ajan rakentamisessa, julkisessa rakentamisessa, asuin- ja maatalousrakentamisessa sekä siltojen rakentamisessa. (Puuhallin suunnittelu 2007.)



KUVIO 6. Pirkkahallin ristikkorakenteinen laajennusosa messukäytössä (Puuinfo Oy 2007.)

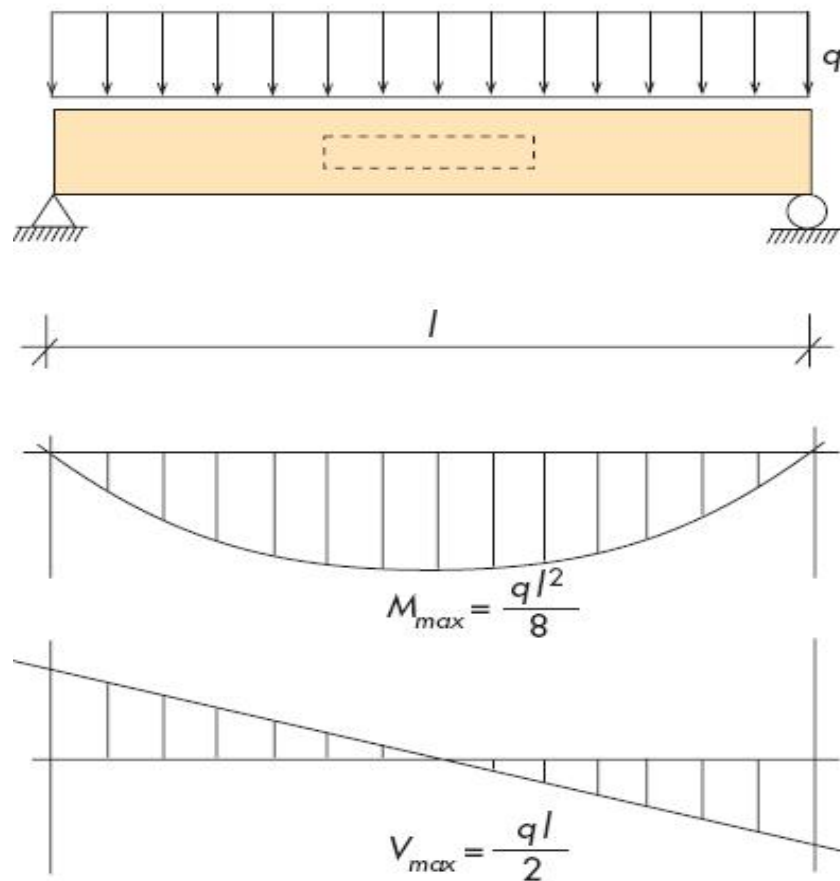
3.3 Runkojärjestelmät

Liimapuu on yksi niistä harvoista taivutuslujista rakennusmateriaaleista, joka mahdollistaa periaatteessa kaikkien tunnettujen rakennemuotojen käytön soveltuen suoraan näkyväksi pinnaksi. Liimapuurakentaminen on siis saanut monet arkkitehdit ja insinöörit hyödyntämään sen tuomia etuja attraktiivisissa ja lujuusopillisesti vaativissa kohteissa. (Monitoimihallit 1988, 73.)

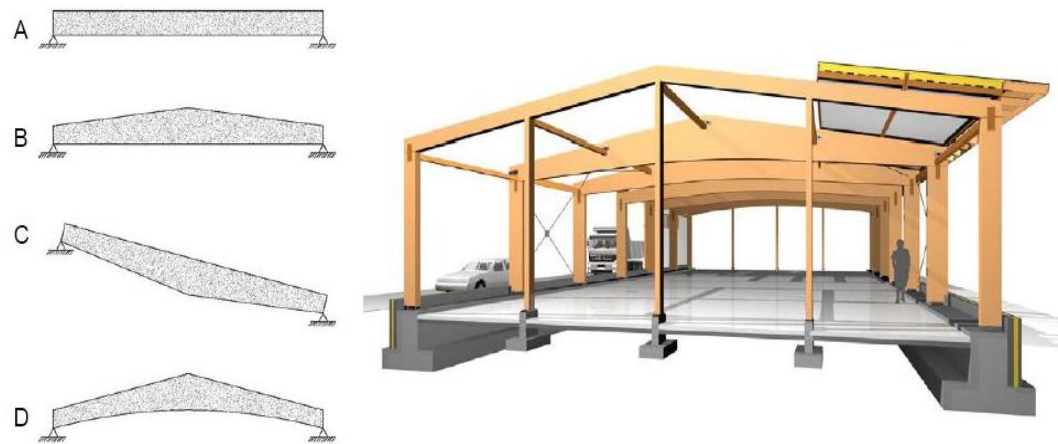
Kustannukset huomioiden on kuitenkin perusteltua käyttää selkeitä ja yksinkertaisia rakenteita. Runkojärjestelmän valintaan vaikuttavat monet asiat kuten rakennuksen toimintatapa ja arkkitehtoniset seikat sekä myös joissain tapauksissa kuljetus- ja tuotantotekniset rajoitukset. (Liimapuu - käsikirja 2003, 26.)

3.3.1 Pilari-palkkijärjestelmä

Pilari-palkkijärjestelmä on yksinkertainen ja tavallinen liimapuurunko, joka koostuu pilareihin tuetuista kaksitukisista palkeista. Palkin rakennekorkeus voi vaihdella voimasuureiden mukaan, mutta myös esteettisyydellä ja toiminnallisuudella on vaikutusta palkin muotoon. Reikien ja syvennyksien sijoittaminen palkkiin tulee tehdä mahdollisimman kauas tulta ja palkin poikkileikkauksen keskiosaan. Kuviossa 7 on havainnollistettu mihin kohtaan reiät tulee vapaasti tuetussa palkissa sijoittaa. (Liimapuu - käsikirja 2003, 27.)



KUVIO 7. Tasaisesti kuormitetun yksiaukkoisen palkin momentti- ja leikkausvoimakuviot (Liimapuu - käsikirja 2003, 28.)



KUVIO 8. Vaihtoehtoisia palkkimuotoja ja bumerangipalkilla toteutettu puuhalli (Puuhallin suunnittelu 2007, 34.)

3.3.2 Jatkuvat palkit

Yksiaukkoista vapaasti tuettua palkkia parempi vaihtoehto tehokkaammassa materiaalin käytössä on useampiaukkoinen palkki. Jatkuvien palkkien järjestelmät ovat suotuisimpia kattorakenteissa, joissa ne toimivat sekundääripalkkeina. (Liimapuu - käsikirja 2003, 28.)

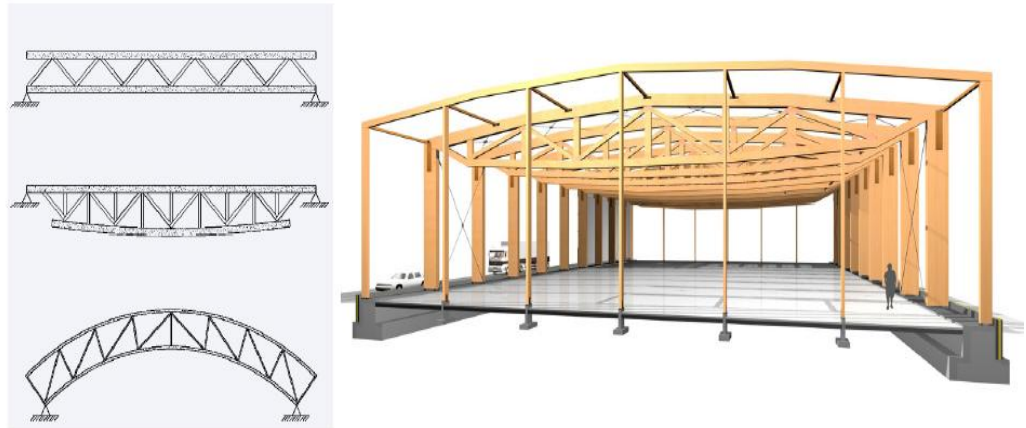


KUVIO 9. Jatkuva palkki – järjestelmä (Liimapuu - käsikirja 2003, 28.)

3.3.3 Ristikot

Massiivipalkit saattavat olla suurta jänneväliä vaativissa kohteissa hyvin tilaa ja materiaalia vieviä, joten tarkoituksenmukaiseksi vaihtoehdoksi käy hyvin ristikkorakenne. Tämä sopii hyvin varsinkin sellaisiin kohteisiin, joissa rakennekorkeus ei ole rajoittava tekijä. Ristikkorakenteet on mahdollista koota

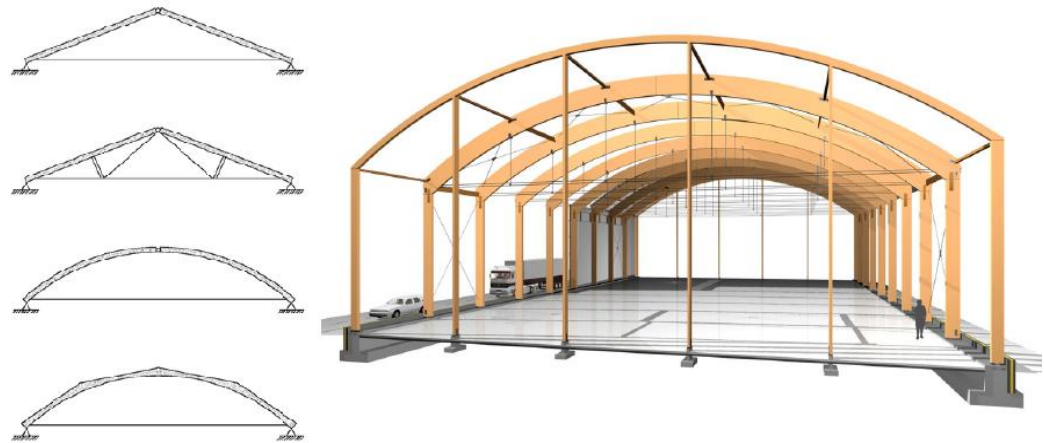
vasta rakennuspaikalla, jolloin niiden kuljettaminen ei aseta rajoituksia. Sauvojen liitoksissa käytetään kaksi-, neljä- tai kuusi leikkeisiä teräslevyjä ja – tappivaarvoja (Puuhallin suunnittelu 2007, 37). Ristikkorakenteissa on mahdollista käyttää liimapuun ja teräksen kombinaatioita. (Liimapuu - käsikirja 2003, 29.)



KUVIO 10. Vaihtoehtoisia ristikkorakenteita ja ristikkorakenteisena toteutettu puuhalli (Puuhallin suunnittelu 2007, 37.)

3.3.4 Kolminivelkattotuolit

Kolminivelkattotuoli koostuu kahdesta toisiaan vastaan kallistuneesta palkista, joiden ylä- ja alapäävät ovat nivelellisesti tuettu. Alapäävät voidaan kytkeä toisiinsa teräksisillä vetotangoilla, myös puisten vetotankojen käyttö on mahdollista. Kattotuolit asennetaan yleensä pilarien varaan, mutta vetotankojen valaminen lattiarakenteisiin on myös hyvin tyypillistä. (Liimapuu - käsikirja 2003, 30.)



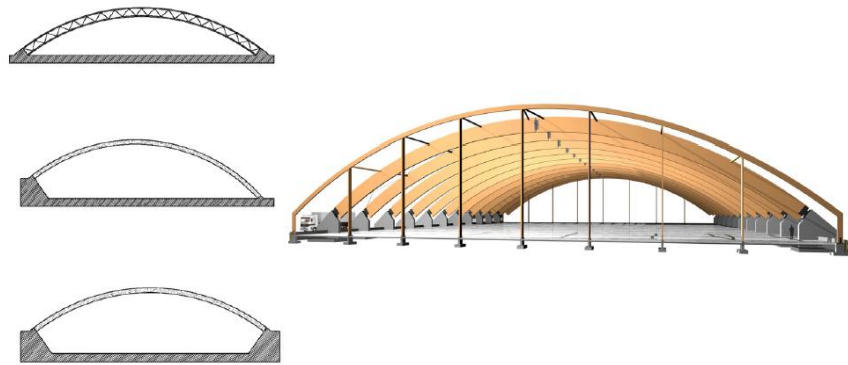
KUVIO 11. Vaihtoehtoisia vetotankokannatin muotoja ja vetotangollisella kaarikannattajalla toteutettu puuhalli (Puuhallin suunnittelu 2007, 39.)

3.3.5 Kaaret

Liimapuusta on helppo tehdä kaarevia rakenteita, mikä onkin liimapuun hienoimpia ominaisuuksia. Puristuslinjaa noudattava kaari, jota puristetaan vain pystysuorin kuormin saa ainoastaan puristusrasituksia koko pituudeltaan. Puristuslinjasta tulee paraabeli, kun kyseessä on tasainen kuormitus ja monikulmio pistekuormista. Materiaalin käyttö on tehokkaampaa kaarirakenteissa kuin palkeissa, koska samalla jännevälillä ja kuormituksella rakennekorkeudeksi tulee vain noin 1/3 h palkkiin tarvittavasta korkeudesta. Kaarirakenteet ovat erittäin käyttökelpoisia, kun jännevälit ovat suuria. Kaarevilla liimapuurakenteilla on saavutettu jopa yli 100 metrin jänneväli. (Liimapuu - käsikirja 2003, 31.)

Kaarirakenteiden tuet tehdään joko liittyvillä rakenteilla, perustuksilla tai erityisillä vetotangoilla, joissa käytetään nivellellistä kiinnitystä. Kaarirakenteita voidaan jatkaa harjalla nivelkiinnityksellä, jolloin kyseessä on kolminivelkaari. (Liimapuu - käsikirja 2003, 32.)

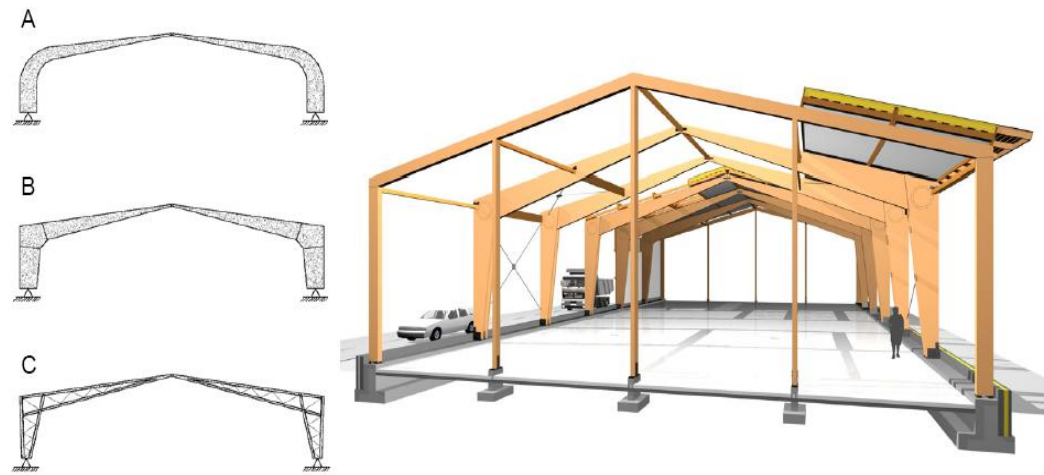
Materiaalimenekkiä voidaan pienentää jäykän kannan avulla, tällöin suurimmat rasitukset kohdistuvat kaaren kantaan. Täysin jäykän kiinnityksen aikaansaamiseksi tarvitaan järeät liitoselimet, mihin liittyy usein liimapuun kuivuessa halkeamisvaara. Tätä riskiä voidaan kuitenkin pienentää hakemalla liimapuurakenteelle sama tasapainokosteus kuin valmiissa rakennuksessa. (Monitoimihallit 1988, 81.)



KUVIO 12. Kaarirakenteen vaihtoehtoisia toteutustapoja ja kaarirungolla toteutettu puuhalli (Puuhallin suunnittelu 2007, 41.)

3.3.6 Kehärunkorakenteet

Kehärunkorakenne on jäykkänurkkaisesti rakennettu katon ja seinän yhdistelmä rakenne, jossa perustuksiin syntyy vaakavoimaa myös pystykuormasta (Puuhallin suunnittelu 2007, 43). Tällä runkorakennejärjestelmällä voidaan rakentaa mielenkiintoisia tilaratkaisuja, jos käytetään yhdistelmä rakenteita perinteisen symmetrisen rakenteen sijaan. Tällaisia ovat esimerkiksi kaarevien ja suorien liimapuurakenteiden yhteen liittäminen. (Liimapuu - käsikirja 2003, 32.)

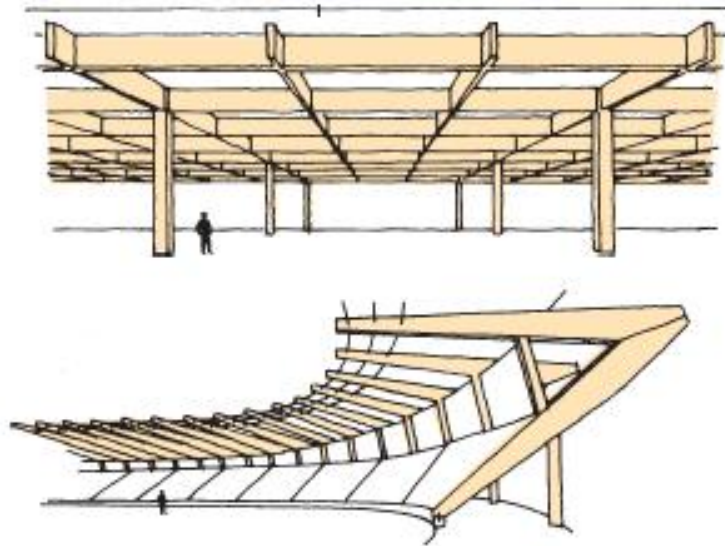


KUVIO 13. Kehärakenteen vaihtoehtoisia toteutustapoja ja kehärunkoinen puuhalli (Puuhallin suunnittelu 2007, 43.)

3.3.7 Ulokkeet ja arinat

Liimapuutekniikka tarjoaa mahdollisuuden ratkaisuihin, joissa rakennuksen toinen tai molemmat sivut ovat avoimia ja pilarittomia. Näiden rakennelmien toteutuksessa on huomioitava merkittävän kiinnitysmomentin vienti liittyviin rakenteisiin. (Liimapuu - käsikirja 2003, 33.)

Arinarakenteen tarkoituksena on kantaa useammassa suunnassa ja mahdollistaa matalampi rakennekorkeus. Tähän rakennetyyppiin sisältyy kuitenkin suhteellisen monimutkaiset liitokset. Systemin etuja päästään hyödyntämään parhaiten, kun jännevälit ja pilarijaot ovat yhtä suuret kaikissa suunnissa. (Liimapuu - käsikirja 2003, 34.)



KUVIO 14. Arina- ja ulokerakenne (Liimapuu - käsikirja 2003, 33–34.)

4 LIIMAPUURAKENTEIDEN LASKENNALLINEN TARKASTELU

Vakaviin henkilövahinkoihin johtavia onnettomuuksia pyritään estämään rajaamalla rakennemurtumien synnyttämiä riskejä kantavien rakenteiden mitoitusohjeiden avulla. Asetettujen vaatimusten täytyminen voidaan tarkistaa rakennusnormien sisältöjen todentamismenetelmien avulla. Suomessa noudatetaan liimapuurakenteiden mitoituksessa Suomen rakentamismääräyskokoelman B10 tai Eurocode 5:n vaatimuksia. Osavarmuuskerroinmenetelmä, jota sovelletaan useimmissa Euroopan maissa rakenteiden tarkistukseen, sisältää kaksi rajatilaa, murto- ja käyttörajatilan. Murtorajatilassa tarkistetaan rakenteen riittävä varmuus murtoa vastaan ja käyttörajatilassa tarkistetaan rakenteen muodonmuutoksia, niille asetettujen toimintavaatimusten suhteen. (Liimapuu - käsikirja 2003, 42.)

Niin kauan kuin rakennetta käytetään suunnitellussa tarkoituksessa, on murtorajatilan mitoituksessa vaadittava riittävä varmuus murtoa vastaan. Rakennemurtuman riskin ylittäminen riippuu, siitä kuinka epävarmoja laskelmatekijät, kuten oletetun kuorman ylitys ja lasketun kantokyvyn alitus, ovat. Käyttörajatilamitoituksessa tyydytään usein suosituksiin sekä rakennuttajan ja suunnittelijan hyväksyntöihin. (Liimapuu - käsikirja 2003, 43.)

4.1 Mitoitusmenetelmiä

Osavarmuuskerroinmenetelmä on nykyisin kansainvälisesti hyväksytty, sitä käytetään pohjoismaisissa puunormeissa ja yleiseurooppalaisessa Eurocode 5:ssä. Osavarmuuskerroin menetelmän tarkoituksena on määrätä tietyt arvot, jotta yksityiskohtaiset parametrit eivät olisi satunnaisia. Eri metodeissa käytetään useita erilaisia varmuuskertoimia. Osavarmuuskertoimissa huomioidaan laskelmiin liittyvien epävarmuuksien vaikutus. Asetettavat osavarmuuskertoimet sekä kuormien ominaisarvot ja materiaalilujuudet annetaan normeissa mitoituksen lähtökohdiksi. (Liimapuu - käsikirja 2003, 43.)

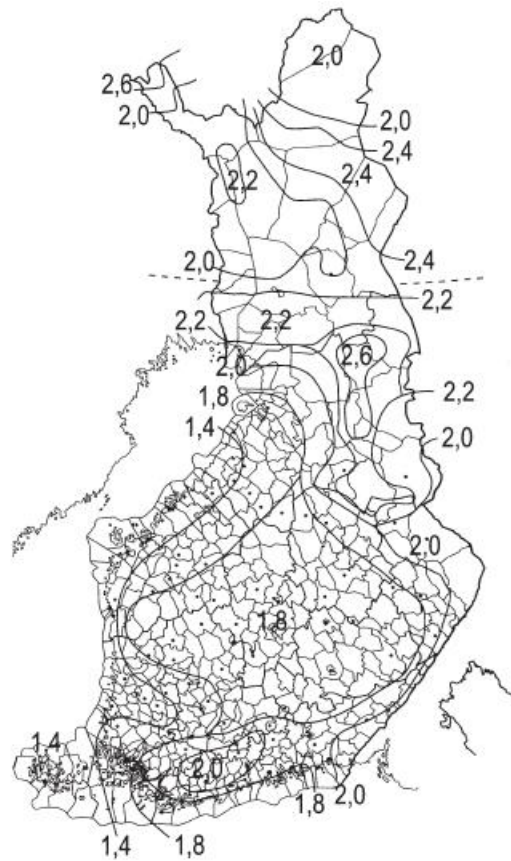
Laskelmissa on huomioitava rakenteisiin vaikuttavat kuormat, jotka aiheuttavat taipumaa, taivutusmomenttia tai muuta kuormavaikutusta. Kuorman mitoitusarvot ovat muotoa:

$$F_d = \gamma F_k$$

$$F_k = \text{ominaiskuorman arvo}$$

$$\gamma = \text{kuorman osavarmuuskerroin}$$

Rakenteiden mitoitus ei yleensä tapahdu yksittäiselle kuormalle, vaan eri kuormien yhdistelmille, esimerkiksi omapainolle ja lumikuormalle. Murtorajatilan tarkastelussa voidaan kuormiksi olettaa sekä ominais- että tavallinen arvo. Käyttörajatilan tarkastelussa käytetään usein vain tavallisten kuorma-arvojen yhdistelmiä. (Liimapuu - käsikirja 2003, 44.)



KUVIO 15. Kattojen peruslumikuormat kN/m^2 (Ympäristöministeriö 1997, 8.)

Rakennusten erilaisten käyttötarkoitusten vuoksi rakennemurtumien aiheuttamien vakavien henkilövahinkojen riski vaihtelee erityyppisissä rakennuksissa. Pohjoismaisissa rakennusnormeissa otetaan rakenteiden erot huomioon ja varmuusluokat määräytyvät sen mukaan, millaiset seuraukset rakennemurtumalla voi olla. Varmuusluokat vaikuttavat joko varmistuksen laajuuteen tai osavarmuuskertoimien arvoon murtorajatilamitoituksessa. (Liimapuu - käsikirja 2003, 44.)

Kuormien kestoajat vaikuttavat rakenteiden jäykkyyteen ja kantokykyyn. Mitoittaessa on huomioitava eri kuormien kestoajat, jotka määräytyvät kuormien vaikutusajan perusteella. Esimerkiksi Eurocode 5:ssä omapaino on pysyvää kuormitusta. Rakenteiden elinkaaren aikana vaihtelevat kuormitukset jaetaan vaikutusajan mukaan pitkäaikaisiin, keskipitkiin, lyhytaikaisiin ja hetkellisiin kuormiin. Näitä voivat esimerkiksi olla tuuli- ja henkilökuormat.

Kuorman kestoajat vaikuttavat rakennusnormeissa annettuihin lujuus ja jäykkyysarvoihin. Lyhyin kesto kuormayhdistelmissä määrää materiaaliarvot kantokyvyn laskennassa. (Liimapuu - käsikirja 2003, 44.)

TAULUKKO 1. Eurocode 5:n aikaluokat (Leivo, Nupponen & Pitkänen 1997, 15.)

| Aikaluokka: | Kuormituksen kesto: |
|---------------|-----------------------------------|
| Pysyvä | Yli 10 vuotta |
| Pitkäaikainen | Yli 6 kuukautta ja alle 10 vuotta |
| Keskipitkä | Yli viikon ja alle 6 kuukautta |
| Lyhytaikainen | Alle viikon |
| Hetkellinen | Esim. onnettomuuskuorma |

Taipumat lasketaan rakenteeseen vaikuttavien kuormitusten taipumien summana. Kuormitusten aiheuttamassa taipumassa on otettava huomioon kuormituksen kesto. Maantieteelliset, ilmastolliset ja kulttuurilliset olosuhteet vaikuttavat kuorman sijoittumiseen tiettyyn aikaluokkaan. (Liimapuu - käsikirja 2003, 45.)

Rakennusnormeissa määritellään myös kosteusluokat, joista jokainen liittyy rakenteille tyypilliseen kosteuden vaihteluun. Puun kosteudella on suuri vaikutus materiaalin jäykkyyteen ja lujuuteen. Rakenteiden suunnittelijan on selvitettävä jokaisessa tapauksessa erikseen, mihin ilmastoluokkaan kyseinen rakenne kuuluu. (Liimapuu - käsikirja 2003, 45.)

TAULUKKO 2. Eurocode 5:n käyttöluokat (Leivo ym. 1997, 15–16.)

| Käyttöluokka: | Kuvaus: |
|---------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1 | Puun keskimääräinen kosteus ei ylitä 12 %:a 20 C:n lämpötilassa |
| 2 | Puun keskimääräinen kosteus ei ylitä 20 %:a 20 C:n lämpötilassa |
| 3 | Puun kosteus on suurempi kuin käyttöluokan 2 keskimääräinen kosteus |

Murtorajatilamitoituksessa otetaan lähtökohdaksi mitoittava ominaislujuusarvo f_k , jota muokataan aika- ja käyttöluokkakertoimella k_{mod} ja osavarmuuskertoimella γ_m . Sahatavaralle ja puumateriaalille osavarmuuskerroin on 1,3.

Osavarmuuskerroin on sama Suomen rakentamismääräyskokoelman B10:ssä sekä Eurocode 5:ssä. (Liimapuu - käsikirja 2003, 45.) Ominaislujuusarvot vaihtelevat EC 5:n ja B10:n välillä erilaisten laskukaavioiden vuoksi, lopputulos on kuitenkin sama.

$$f_d = k_{mod} \times \left(\frac{f_k}{\gamma_m} \right)$$

TAULUKKO 3. Kertoimien k_{mod} arvot liimapuulle Eurocode 5:ssä (Leivo ym. 1997, 16.)

| Materiaalin/Kuorman aikaluokka: | Käyttöluokka: | | |
|---------------------------------|---------------|-----|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Pysyvä | 0,6 | 0,6 | 0,5 |
| Pitkäaikainen | 0,7 | 0,7 | 0,55 |
| Keskipitkä | 0,8 | 0,8 | 0,65 |
| Lyhytaikainen | 0,9 | 0,9 | 0,7 |
| Hetkellinen | 1,1 | 1,1 | 0,9 |

TAULUKKO 4. Liimapuun ominaislujuudet, jäykkyydet ja tiheys lujuusluokissa GL32, L40 ja L30 (Leivo ym. 1997, 19.)

| Ominaislujuudet (N/mm ²) | | GL32 | L40 | L30 |
|-------------------------------------------|----------------|-------|------|------|
| Taivutus | $f_{m,g,g}$ | 32 | 31 | 25 |
| Veto | $f_{t,0,g,k}$ | 24 | 21 | 17 |
| Veto | $f_{t,90,g,k}$ | 0,45 | 0,4 | 0,4 |
| Puristus | $f_{c,g,k}$ | 29 | 30 | 24 |
| Puristus | $f_{c,90,g,k}$ | 6 | 4,3 | 3,5 |
| Leikkaus | $f_{v,g,k}$ | 3,5 | 2,4 | 2,4 |
| Jäykkyysominaisuudet (N/mm ²) | | | | |
| Kimmo-moduuli | $E_{0,mean}$ | 13500 | 8500 | 7000 |
| Kimmo-moduuli | $E_{0,05}$ | 10800 | | |
| Kimmo-moduuli | $E_{90,mean}$ | 450 | 280 | 230 |
| Liukumoduuli | G_{mean} | 840 | 420 | 350 |
| Tiheydet kg/m ³ | | | | |
| Tiheys | ρ_k | 440 | | |

Käyttörajatila mitoituksessa on huomioitava rakenteiden riittävä jäykkyys, jotta ei tulisi haitallisia värähtelyitä tai muodonmuutoksia, jotka heikentäisivät rakennuksen toimintaa (Liimapuu - käsikirja 2003, 46).

Kattopalkkien taipumista on aiheellista rajoittaa ulkonäöllisistä syistä. Taipumat, jotka ovat suuruusluokaltaan 1/300 jännevälisiä, voivat olla näkyviä. Erityyppiset käyttötilat vaikuttavat ulkonäköön liittyviin vaatimuksiin. Yleisesti suositeltavat taipumat suhteessa jänneväliin eri rakenne-elementeissä ja käyttöalueilla esitellään taulukossa 5. (Liimapuu - käsikirja 2003, 47.)

TAULUKKO 5. Taipumarajat suhteessa vapaaseen jänneväliin (Liimapuu - käsikirja 2003, 46).

| Käyttöalue: | Muuttava kuorma (tavallinen arvo): | Kokonaiskuorma (sis. oman painon): |
|------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Kattopalkit | | |
| Teollisuus | 1/200 | 1/150 |
| Koulut, kaupat jne. | 1/250 | 1/200 |
| Lattiapalkit | | |
| Tavallisesti | 1/500 | 1/300 |
| Varastot ja muut tilat | 1/200 | 1/150 |
| Ristikot | | |
| Tarkka laskenta | 1/250 | 1/200 |
| Likimääräinen laskenta | 1/500 | 1/400 |
| Ulokkeet | 1/250 | 1/200 |
| Katto-orret | | |
| Ilman sisäkattoa | 1/250 | 1/200 |
| Sisäkatolla | 1/150 | 1/100 |

4.2 Liimapuun mitoituksen erityispiirteet

Tietyissä olosuhteissa suurten liimapuupalkkien taivutuslujuus on alhaisempi kuin pienten. Tilavuusvaikutuksen koetulokset ja teoreettiset tutkimukset koskevat lyhytaikaista kuormitusta vakiokosteusolosuhteissa. Todellisuudessa rakenteet on mitoittava pitkäaikaisille kuormituksille, esimerkiksi lumikuormille, jolloin materiaalin hiipumisella on merkitystä.

Eurocode 5 ja Suomen rakentamismääräyskokoelma B10 ovat ottaneet käyttöön liimapuun tilavuuden vaikutuksen taivutusjännitystarkastelussa, jossa ominaislujuudet kerrotaan korjauskertoimella k_h . (Liimapuu - käsikirja 2003, 53.)

$$k_h = \left(\frac{h_0}{h} \right)^{\left(\frac{1}{9} \right)}$$

h = palkin korkeus (mm)

h_0 = 300 (mm)

Jos korkeita ja hoikkia rakenteita, joita kuormitetaan taivutusmomentilla horisontaalisen pääakselin ympäri, ei estetä kiertymästä tai taipumasta sivusuunnassa, voivat ne kiepahtaa tai kaatua kuormasta (Liimapuu - käsikirja 2003, 54).

Palkinpäissä sijaitsevat pienetkin lovet voivat olennaisesti vähentää palkin kantokykyä muodostaessaan halkeamia. Riskialttiita ovat erityisesti suuret kohteet, joissa rakenteet saattavat joutua suuriin kosteusvaihteluihin. Lovien halkeamanmuodostusta voidaan lieventää niiden vinosahauksella, pintakäsittelyllä, pyöristyksellä tai vahvistuksella. (Liimapuu - käsikirja 2003, 59.)

Rakenteen voimavuotoa häiritsevät suuremmat reiät, jotka muodostavat äkillisiä poikkileikkausmuutoksia. Reikien lähelle syntyy merkittäviä poikittaisveto- ja leikkausjännityksiä, yhdessä kuivumishalkeamien kanssa nämä voivat heikentää rakenteen kantokykyä merkittävästi. Reikien tekemistä satula-, bumerangi- ja pulpettipalkkeihin, kehänurkkarakenteisiin sekä suuriin kosteusvaihteluihin joutuviin rakenteisiin on vältettävä. (Liimapuu - käsikirja 2003, 61.)

Korkeudeltaan muuttuvat liimapuurakenne-elementit, kuten harjapalkit, kehärakenteet ja jatkuvat palkit, joissa on viisteet sivuilla, on koottu vinoon leikatuista lamelleista. Taivutuslujuutta on tällöin vähennettävä, koska katkaistun

reunan taivutusjännitykset ovat yhdensuuntaiset reunan kanssa ja muodostavat kulman α puunsyihin nähden. Näin myös taivutusjännitysten jakautuminen muuttuu verrattuna tasakorkeaan palkkiin. Katkaisun sijainti joko vedetyllä tai puristetulla puolella vaikuttaa lujuusvähennyksiin. (Liimapuu - käsikirja 2003, 64.)

$$k_{\alpha} = \frac{1}{\left(\frac{f_b}{f_{90}}\right) \times \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

$f_{90} = f_{t,90}$, kun katkaisu on vedetyllä puolella

$f_{90} = f_{c,90}$, kun katkaisu on puristetulla puolella

f_b = taivutuslujuus

Kaarevien rakennuselementtien valmistus liimapuusta on yksi sen hienoimmista ominaisuuksista. Sisäisten jännitysten syntymisen lamellien taivutuksesta on tärkeää huomioida taivutuslujuudessa, varsinkin kun kyseessä ovat pienet taivutussäteet. Hiipumisominaisuudet, jotka syntyvät lämmön ja kosteuden vaikutuksesta, tasaavat sisäisiä jännityksiä. (Liimapuu - käsikirja 2003, 64.)

Liimapuuelementit toimitetaan tavallisesti 12 % kosteudessa, mikä vastaa Eurocode 5:ssä käyttöluokkaa 1. Kosteusmäärän ollessa erilainen kuin ympäristön suhteellinen kosteus liimapuu pyrkii tasapainokosteuteen ja lämpötilaan ympäristön vaikutuksesta. Ilmaston kausittaiset muutokset vaikuttavat puurakenteiden kosteusvaihteluihin. Sisätiloissa puu on kuivimmillaan yleensä talvella ja ulkotilarakenteissa kesällä. Kosteus vaihtelut saattavat olla jopa 3-10 prosenttiyksikköä käyttötilasta riippuen. Kosteusvaihtelut saavat liimapuurakenteen turpoamaan ja kutistumaan sekä syiden että syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Liikkeet ovat syiden suunnassa 0,01 % ja kohtisuoraan syitä vastaan 0,2 % jokaista puun kosteuden muutosprosenttia kohden. Liitosten suunnittelussa nämä kosteusliikkeet tulee huomioida siten, että niiden liikkumista estetään niin vähän kuin mahdollista. (Liimapuu - käsikirja 2003, 66.)

4.3 Tasakorkean liimapuupalkin mitoitus esimerkki Eurocode 5:n mukaan

Liimapuurakenteen mitoitus on riippuvainen monesta tekijästä. Laskentaan vaikuttavat muun muassa jänneväli, kehäväli, käyttökohde, palkin muoto ja ilmasto. Seuraavaksi on esitelty tasakattoisen tasakorkean liimapuupalkin lujuuslaskelmat Eurocode 5:n mukaan.

Materiaalitiedot: Liimapuun lujuusluokka: GL32,
Aikaluokka: keskipitkä
Käyttöluokka: 2

$$f_{m,g,k} = 32 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{v,g,k} = 3,5 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{0,\text{mean}} = 13500 \text{ N/mm}^2 \text{ (muodonmuutoksia laskettaessa)}$$

$$k_{\text{mod}} = 0,8$$

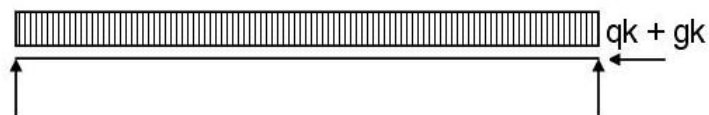
$$f_{m,d} = \left(\frac{32 \text{ N/mm}^2}{1,3} \right) \times 0,8 \approx 19,7 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{v,d} = \left(\frac{3,5 \text{ N/mm}^2}{1,3} \right) \times 0,8 \approx 2,15 \text{ N/mm}^2$$

Rakenteen mitat



Kuormitustiedot



Muuttuva kuorma (lumikuorma) $qk = 2,0 \text{ kN/m}^2$

Pysyvä kuorma (vesikaton paino) $gk = 1,0 \text{ kN/m}^2$

Omapaino ($V \times \rho$) $gk_1 = 0,92 \text{ kN/m}$

Palkki: pituus $L = 15000 \text{ mm}$
korkeus $h = 855 \text{ mm}$
leveys $b = 215 \text{ mm}$
k-jako $k = 3000 \text{ mm}$

Muuttuvan kuorman osavarmuuskerroin $\gamma_q = 1,5$

Pysyvän kuorman osavarmuuskerroin $\gamma_g = 1,2$

$$q_d = 2,0 \text{ kN/m}^2 \times 3,0\text{m} \times 1,5 = 9 \text{ kN/m}$$

$$g_d = 1,0 \text{ kN/m}^2 \times 3,0\text{m} \times 1,2 = 3,6 \text{ kN/m}$$

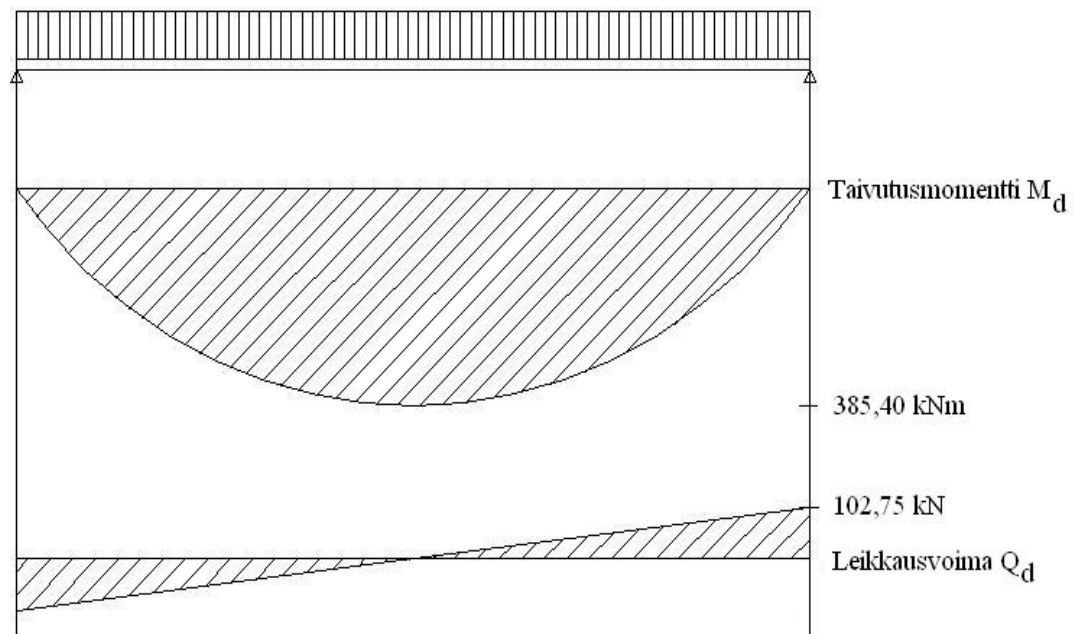
$$g_{d1} = 0,92 \text{ kN/m} \times 1,2 = 1,1 \text{ kN/m}$$

$$P_d = q_d + g_d + g_{d1} = 13,7 \text{ kN/m}$$

MITOITUS:

$$M_{max} = \frac{P_d \times L^2}{8} = \frac{13,7 \text{ kN/m} \times (15\text{m})^2}{8} \approx 385,40 \text{ kNm}$$

$$Q_{max} = \frac{P_d \times L}{2} = \frac{13,7 \text{ kN/m} \times 15\text{m}}{2} = 102,75 \text{ kN}$$



Taivutusjännitys:

$$W = \frac{b \times h^2}{6} = \frac{215\text{mm} \times (855\text{mm})^2}{6} \approx 26195062,5\text{mm}^3$$

$$\sigma_b = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{385,4\text{kNm}}{26195062,5\text{mm}^3} \approx 14,71\text{N/mm}^2 < 19,7\text{N/mm}^2$$

Käyttöaste: 74,71 %

Tuen leikkaus:

$$\tau_{\max} = 1,5 \times \left(\frac{Q_{\max}}{b \times h} \right) = 1,5 \times \left(\frac{102,75\text{kN}}{215\text{mm} \times 855\text{mm}} \right) \approx 0,83\text{N/mm}^2 < 2,15\text{N/mm}^2$$

Käyttöaste: 39,0 %

Huomioidaan leikkausvoiman pienennys tuella, 855 mm etäisyydellä tuelta:

$$Q_{\text{mit}} = \frac{Pd \times (L - 2 \times h)}{2} = \frac{13,7\text{kN/m} \times (15000\text{mm} - 2 \times 855\text{mm})}{2} \approx 91,04\text{kN}$$

$$\tau_{\max} = 1,5 \times \left(\frac{Q_{\max}}{b \times h} \right) = 1,5 \times \left(\frac{91,04\text{kN}}{215\text{mm} \times 855\text{mm}} \right) \approx 0,74\text{N/mm}^2 < 2,15\text{N/mm}^2$$

Käyttöaste: 34,6 %

Taipuma:

$$I = \left(\frac{b \times h^3}{12} \right) = \left(\frac{215 \text{ mm} \times (855 \text{ mm})^3}{12} \right) \approx 1,12E + 10 \text{ mm}^4$$

$$q_{\text{ref}} = 1,0 \text{ kN/m}$$

$$u_{\text{ref}} = \frac{5 \times q_{\text{ref}} \times L^4}{384 \times E_{0,\text{mean}} \times I} = \frac{5 \times 1,0 \text{ kN/m} \times (15000 \text{ mm})^4}{384 \times 13500 \text{ N/mm}^2 \times 1,12E + 10 \text{ mm}^4} \approx 4,4 \text{ mm}$$

TAULUKKO 6. Kertoimen k_{def} arvot liimapuulle (Leivo ym. 1997, 22.)

| Aikaluokka | Käyttöluokka: | | |
|----------------|---------------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Pysyvä | 0,60 | 0,80 | 2,00 |
| Pitkäaikainen | 0,50 | 0,50 | 1,50 |
| Keskipitkä | 0,25 | 0,25 | 0,75 |
| Lyhyt aikainen | 0,00 | 0,00 | 0,30 |

Pysyvän kuorman $k_{\text{def}} = 0,8$

Muuttuvan kuorman $k_{\text{def}} = 0,25$

$$u_1 = ((k \times gk) + gk_1) \times (1 + k_{\text{def}}) \times u_{\text{ref}} =$$

$$((3 \text{ m} \times 1 \text{ kN/m}^2) + 0,92 \text{ kN/m}) \times (1 + 0,8) \times 4,4 \text{ mm} \approx 31,0 \text{ mm}$$

$$u_{2,\text{inst}} = k \times qk \times u_{\text{ref}} = 3 \times 2 \text{ kN/m}^2 \times 4,4 \text{ mm} \approx 26,4 < L/300 = 50 \text{ mm}$$

Käyttöaste: 52,8 %

$$u_2 = k \times qk \times (1 + k_{\text{def}}) \times u_{\text{ref}} = 3 \text{ m} \times 2 \text{ kN/m}^2 \times (1 + 0,25) \times 4,4 \text{ mm} = 33,0 \text{ mm}$$

$$\text{Taipuma-arvio} = u_1 + u_2 = 64,0 \text{ mm} < L/200 = 75 \text{ mm}$$

Käyttöaste: 85,3 %

Kiepahdus:

$$l_c = L \text{ (tuelta tuettu)}$$

$$m = \text{kiepahduskerroin} = 0,88$$

$$\sigma_{crit} = \frac{0,75 \times E_{0,05} \times b^2}{h \times l_c} = \frac{0,75 \times 10800 \text{ N/mm}^2 \times (215 \text{ mm})^2}{855 \text{ mm} \times 15000 \text{ mm}} \approx 29,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,g,g} \times m}{\sigma_{crit}}} = \sqrt{\frac{32 \text{ N/mm}^2 \times 0,88}{29,2 \text{ N/mm}^2}} \approx 0,98 \Rightarrow \text{jos } 0,75 \leq \lambda_{rel,m} \leq 1,4, \text{ niin}$$

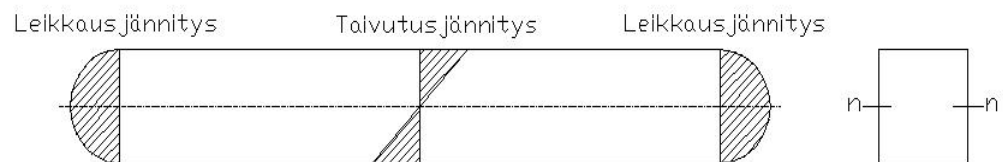
$$k_{crit} = 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m}$$

$$k_{crit} = 1,56 - 0,75 \times 0,98 = 0,825$$

$$\sigma_b = 14,71 < 0,825 \times 19,7 \text{ N/mm}^2 \approx 16,25 \text{ N/mm}^2$$

Käyttöaste: 91 %

Kuviossa 16 viivoitetulla alueella tasakorkeassa liimapuupalkissa halkeamien muodostuminen on vaarallisinta suurten leikkaus- ja taivutusjännitysten vuoksi.



KUVIO 16. Tasakorkean liimapuupalkin taivutus- ja leikkausjännityskäyrät neutraaliakselin suhteen.

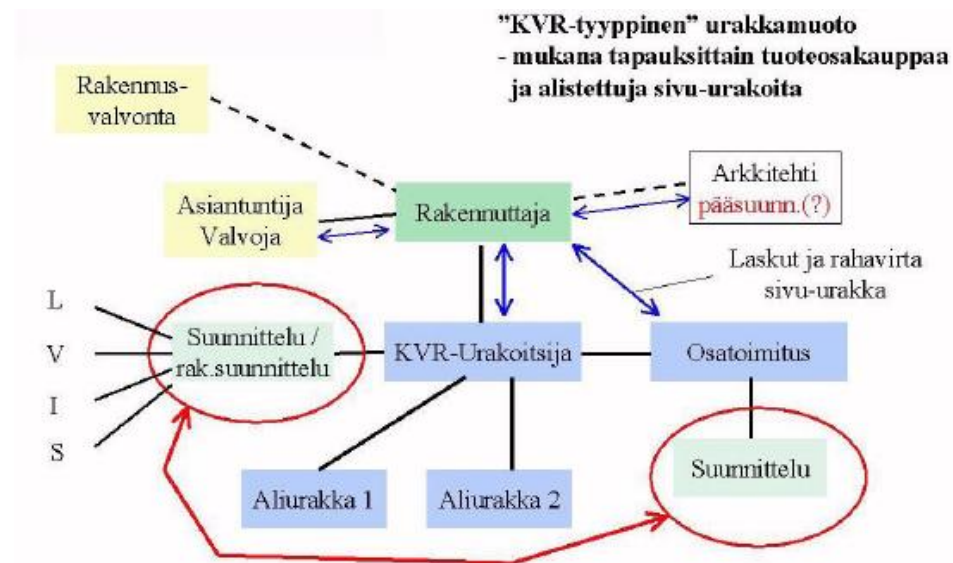
5 LIIMAPUURAKENTEIDEN VAURIOKARTOITUS

Viime vuosikymmenien aikana Suomessa on tullut yleisön tietoon keskimäärin yksi katon sortuma vuodessa. Lumen aiheuttama kuormitus ei ole ollut syynä viime aikojen sortumisiin, sillä katoille suunnitellut lumikuormat eivät ole ylittyneet yhdessäkään edellä mainitussa onnettomuustapauksessa. Lumikuormia suunnitellessa varaudutaan jopa 60 % ylikuormitukseen. Vuonna 1998 ympäristöministeriö korotti Itä- ja Pohjois-Suomeen rakennettavien talojen suunnittelussa käytettäviä lumikuorman arvoja. (Ranta-Maunus 2003.)

Aiempien vuosien vaurioiden analysoinnista on selvinnyt, että syynä ovat olleet useiden virheiden kumuloitumiset. Virheiden syntyminen voi tapahtua suunnittelussa, asennuksessa tai valmistuksessa, jos laadunvalvonnassa on puutteita. Rakenteiden vauriot ovat selvästi johtuneet puutteista suunnittelussa, tehdasvalmistuksessa ja asennuksessa. Ammattilaisten toiminnan laadukkuus on todennäköisesti heikentynyt viime vuosina. Virheiden syntyminen eivät ole johtuneet tuntemattomista ilmiöistä, määräyksistä, ohjeiden puuttumisesta tai suunnittelussa käytetyistä varmuuskertoimista. (Ranta-Maunus 2003.)

VTT:n tekemän tutkimuksen mukaan rakennusvirheiden syntyyn vaikuttavista tekijöistä valtaosa on suunnitteluvirheitä. Rakennusvirheet aiheutuvat ihmisen toiminnasta, ei niinkään materiaalista, kuorma- tai kosteusolosuhteista. Tutkimuksen mukaan puurakentamisen tietotaitoa olisi lisättävä ja laadunvarmistusta parannettava rakennesuunnittelussa ja työmaalla. (Toratti 2006, 15.) Suunnitteluvirheet eivät kuitenkaan selitä kaikkia tapauksia itsestään, vaan vaurioiden syntyyn ja sortumisiin on liittynyt muita oleellisia tekijöitä, joita ei ole voitu selittää suunnitteluvirheinä. Sen vuoksi ohjeiden parantaminen ja suunnittelijoiden koulutus ei voi olla ainoa keino välttää vastaavanlaisia tilanteita tulevaisuudessa, vaan huomiota tulisi kiinnittää myös rakennuttajan huolehtimisvelvollisuuden hoitamiseen. (Leino & Korttesmaa 2006, 12.)

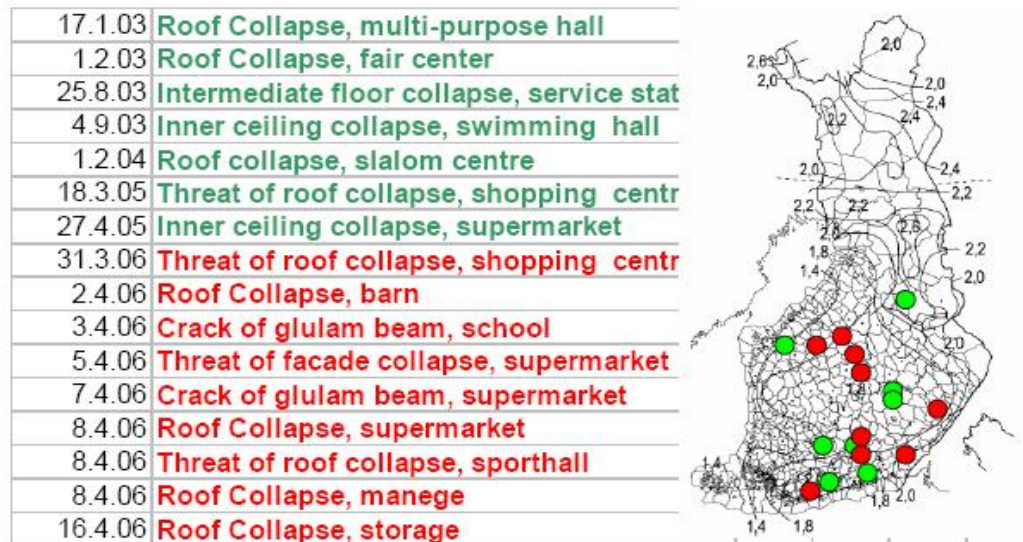
Nykyään rakennusalalle on tyypillistä KVR- mallin ja tuotesakaupan yleisyys, joka tarkoittaa, että suunnittelun ohjaus on siirtynyt toteuttajalle. Lisäksi materiaalien välillä on menty pitkien jänneväliden ja hoikkuuksien kilpailuun. KVR -mallin urakointi altistaa havaintojen perusteella riskialttiiseen säästämiseen. (Mölsä 2003.)



KUVIO 17. Periaatekuva urakoiden ja suunnittelun osittamisesta (Leino & Korttesmaa 2006, 15.)

5.1 Liimapuurakenteiden vaurioita

Onnettomuustutkintakeskus tutkii Suomessa sattuneet suuronnettomuudet tai niiden vaaratilanteet riippumatta niiden laadusta. Suuronnettomuuksien vaaratilanteiden selvityksissä on myös kantavien rakenteiden vaurioihin ja sortumisiin liittyvät selvitykset. Onnettomuustutkintakeskuksen tapaukset eivät muodosta kokonaiskuvaa rakennusalalla tapahtuvista vaurioista. Tutkittavat tapaukset ovat pääsääntöisesti henkilöturvallisuuden kannalta vakavimpia tapauksia.



KUVIO 18. OTK:n tutkinnassa olleet rakenteiden vauriotapaukset 2003–2006 (Huuhtanen 2006, 2.)

Onnettomuustutkintakeskuksen kantavien rakenteiden vauriotutkintaselostuksista kaksi tapausta yhdestätoista tapauksesta liittyvät liimapuurakenteisiin (Liite 1). Vuonna 2003 tapahtunut Jyväskylän messuhallin tappivaarnaliitosten murtuminen on selitetty liitoksen huonolla laadulla ja lohkeamismurtumistarkastelun puuttumisella eurooppalaisesta puurakenteiden suunnitteluohjeesta (Eurocode 5). Iisalmessa vuonna 2000 tapahtunut uimahallin liimapuupalkin rikkoutuminen johtui liimapuupalkin pään vääränlaisen ankkuroinnin vuoksi. Muut tapaukset liittyvät alakattojen romahtamisiin, betonipalkkien vaurioihin ja työn laadun varmistamisiin. (Onnettomuustutkintakeskus 2007.)



KUVIO 19. Vaarnatappiliitoksen murtuminen Jyväskylän messuhallissa (Onnettomuustutkintakeskus 2003.)



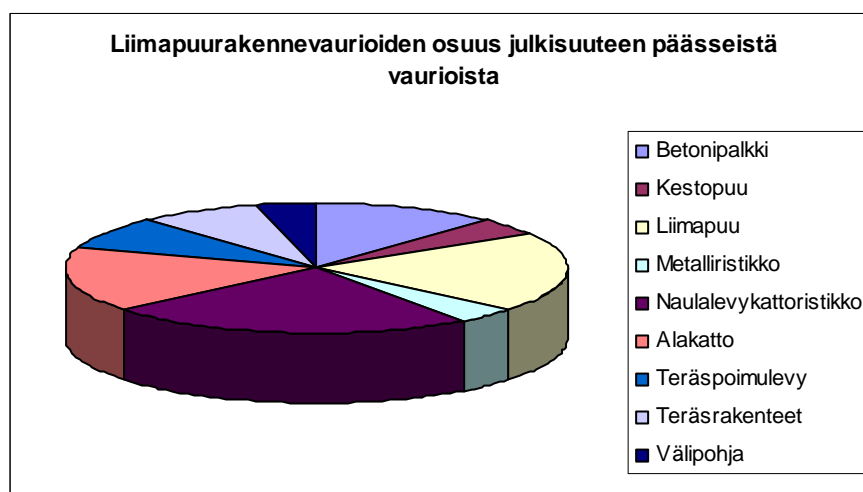
KUVIO 20. Rikkoutunut liimapuupalkki Iisalmen uimahallissa (Onnettomuustutkintakeskus 2000.)

Onnettomuustutkintakeskuksen johtava tutkija Kai Valoselta saadun sähköpostin mukaan työn alla on turvallisuusselvitys S1/2006Y, jossa on kerätty yhteen tutkintaan kahdeksalla eri paikkakunnalla kevättalvena 2006 sattunutta onnettomuutta tai vaaratilannetta (Liite 2). Tapauksista kolme liittyy liimapuurakenteiden vaurioihin. Laukaalla liikuntasalin liimapuupalkin

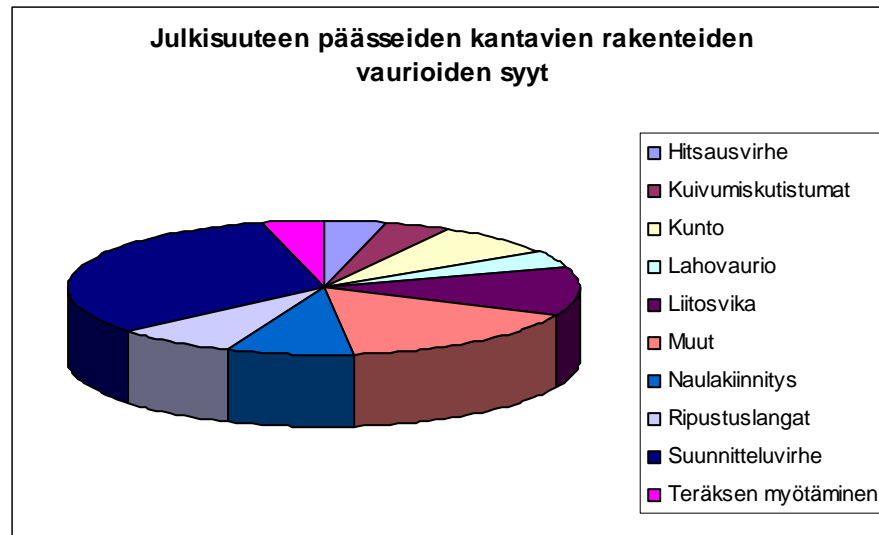
pulttiliitoksessa oli tapahtunut halkeamista, halkeaminen on ilmeisesti johtunut välyksestä palkin alapuolella, kuormituksen ja kuivumiskutistumisen seurauksena. Keiteleellä tapahtunut marketin liimapuupalkin vaurioituminen oli johtunut vinoliitoksen peittämisestä, joka oli toteutettu vanhalla liimatyypillä. Joensuun tukkuliikkeen katon romahtamisen syynä oli teräspoimulevyn peittäminen liimapuukannattajien välistä. (Valonen 2007.)

Oulussa vuonna 2003 lumen kasaantuminen aiheutti vaakakuorman vuoksi liimapuupalkin pään irtoamisen rakenteista (Onnettomuustutkintakeskus 2000). Vuonna 2003 Säynätsalon Finndomon tehtaalla liimapuupalkissa oli halkeamia, rakennuksella on ikää yli 30 vuotta. Tapaus oli ainoa liimapuupalkkeihin liittyvä vaurio rakennuslehden kokoaman kantavien rakenteiden vauriolistan mukaan (Liite 3). (Mölsä 2003.)

Julkisuuteen päässeiden kantavien rakenteiden vaurioista liimapuupalkkien osuus on suhteellisen pieni, kuten kuviosta 21 havaitaan. Havaitut vauriot ovat lähinnä syntyneet suunnittelun ja laatuksen virheistä. Itse liimapuu rakennusmateriaalina ei ole aiheuttanut vaurioita tai romahduksia missään edellä mainituissa kohteissa. Vauriot ovat johtuneet lähinnä suunnittelu- ja liitosvirheistä sekä kuivumiskutistumista.



KUVIO 21. Liimapuurakennevaurioiden osuus julkisuuteen päässeistä vaurioista



KUVIO 22. Julkisuuteen päässeiden kantavien rakenteiden vaurioiden syyt

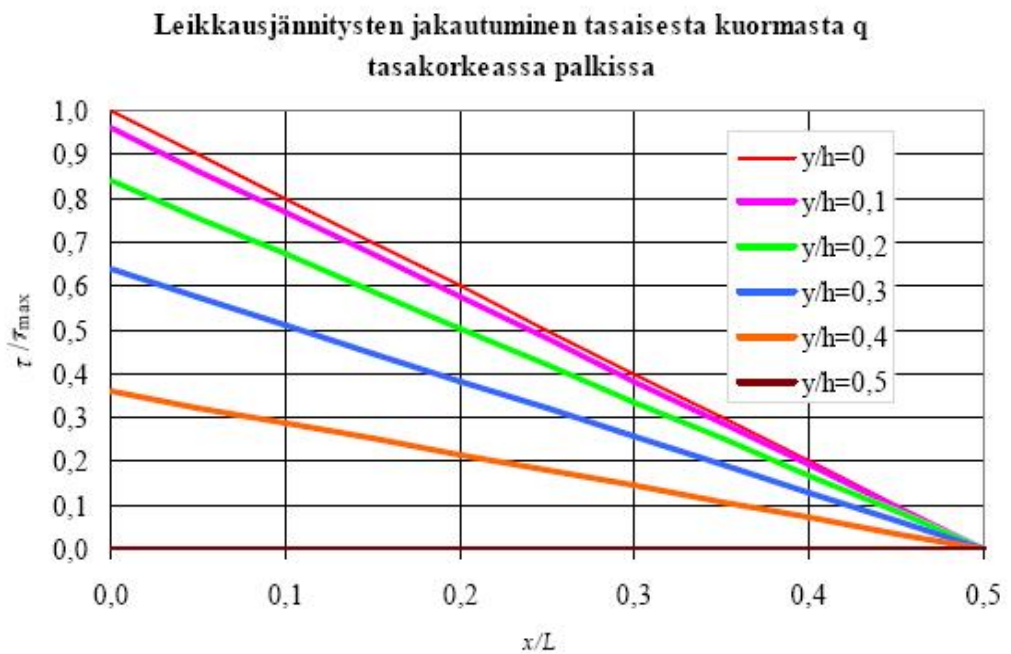
5.2 Liimapurakenteiden tyypillisimmät vauriot

Puurakenteissa on hyvin tyypillistä havaita halkeamia. Usein halkeamilla on vain esteettistä merkitystä ja harvoin vaikutusta rakenteiden kantavuuteen. Suunnitteluvaiheessa on otettava huomioon ne ominaisuudet joilla on merkitystä puun halkeamisen kannalta. Esiintyvien halkeamien leviämistä voidaan myös rajoittaa niin, että niistä ei ole haittaa rakenteiden kantavuudelle. (VTT 2006a, 4.)

5.2.1 Liimapurakenteissa esiintyvien halkeamien syyt

Liimapurakenteissa esiintyvät halkeamat ovat pääasiallisesti puun kuivumisesta, syitä vastaan kohtisuoran vetorasituksen ylittymisistä, leikkausrasituksen ylittymisistä tai materiaali- ja valmistusvirheistä johtuvia. Jos liimapuussa havaittava halkeama kulkee selvästi liimasauman kohdalla, saattaa se johtua liimausvirheestä. Valmistusvirheet ovat kuitenkin käytännössä melko harvinaisia. Leikkausrasitusten ylittyminen on useimmiten havaittavissa palkin tukien lähetyvillä ja suunnilleen palkin korkeuden puolella välissä. Leikkausrasituksen ylittyminen on myös harvinaista edellyttää lisäksi liimausvirheiden ja kuivumishalkeamien esiintymistä.

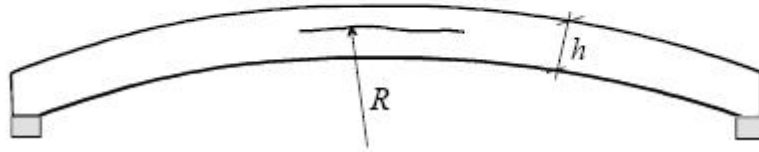
Kuvion 23 tapaisten käyrästöjen avulla voidaan arvioida palkin leikkausmurtoriskiä, kun tiedetään halkeaman paikka ja syvyys, esimerkiksi jos palkki on 500 mm korkea ja jänneväliltään 5000 mm. Kun jännitystä tarkastellaan 500 mm päässä tuelta ($x/L=0,1$) ja 200 mm korkeudella palkin alapinnasta ($y/h=0,4$), on leikkausjännityksen suhteellinen jakauma noin 0,3.



KUVIO 23. Leikkausjännitysten suhteellinen jakauma tasakorkeassa palkissa pituussuunnassa x ja korkeussuunnassa y . (VTT 2006a, 6.)

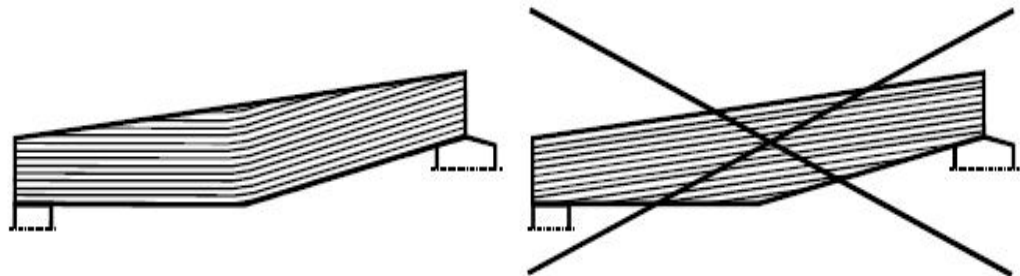
Syitä vastaan kohtisuorassa oleva vetolujuus on puulla pieni, minkä vuoksi pienetkin vetorasitukset voivat olla hyvin pahoja. Vetorasituksia syntyy esimerkiksi silloin, kun taivutusmomentti pyrkii oikaisemaan taivutettua palkkia, loveus on tehty palkin vedetyn reunan suuren leikkausvoiman alueelle ja palkissa on ripustuskuormia.

- b on palkin leveys,
- h on palkin korkeus ja
- R on palkin kaarevuussäde poikkileikkauksen korkeuden puolivälissä.



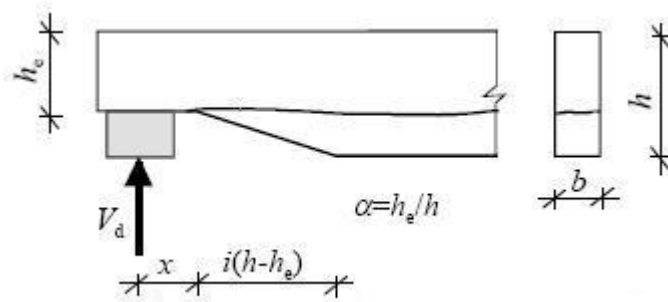
KUVIO 24. Mahdollinen vetomurron paikka kaarevassa palkissa, kun taivutusmomentti pyrkii oikaisemaan palkkia. (VTT 2006a, 7.)

Nurin käännetty harjapalkki eli mahapalkki on riski silloin, kun sen vedetyllä reunalla sijaitsevat lamellit on leikattu vinosti reunaan nähden, tuolloin taivutetut lamellit toimivat paremmin. Kuvion 25 oikean puoleinen mahapalkki on vaarallinen, koska taivutusjännitys, leikkausjännitys ja syitä vastaan kohtisuora vetojännitys osuu samaan alareunan pisteeseen. (VTT 2006a, 7.)



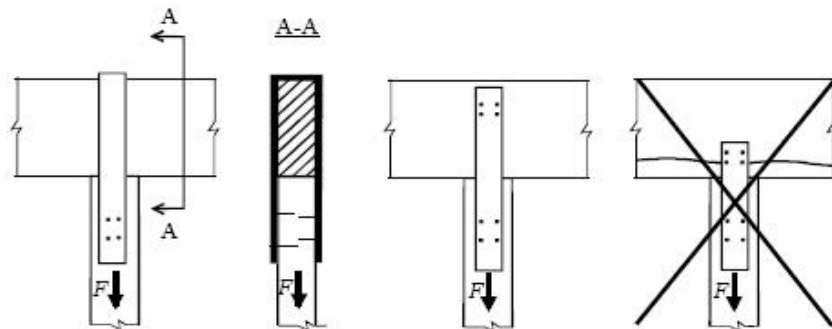
KUVIO 25. Mahapalkki (VTT 2006a, 7.)

Loveuksen vaikutus otetaan suunnitteluohjeissa huomioon yksinkertaisuuden vuoksi leikkausmitoituksen avulla. Poikkileikkaukselle, josta on vähennetty loveuksen osuus, lasketaan leikkausjännitys ja tätä arvoa verrataan puun pienenettyyn leikkauslujuuteen. (VTT 2006a, 8.)



KUVIO 26. Alareunassa oleva loveus ja todennäköisin murtumakohta (VTT 2006a, 8.)

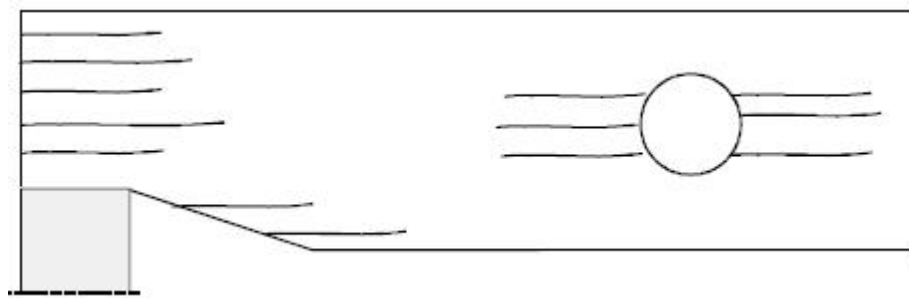
Ripustusliitokset ovat liitoksia, joissa sekundaaripalkki liitetään primääripalkin kylkeen. Palkin alareunaan tehdyt liitokset saattavat halkaista palkin sen heikon vetolujuuden vuoksi, varsinkin silloin kun palkki on päässyt voimakkaasti kuivumaan. Ripustusliitoksen lujuuteen vaikuttaa, se missä kohdassa se on palkin korkeussuunnassa ja kuinka leveä liitosalue on. (VTT 2006a, 8.)



KUVIO 27. Ripustusten laatu, huonontuen vasemmalta oikealle (VTT 2006a, 10.)

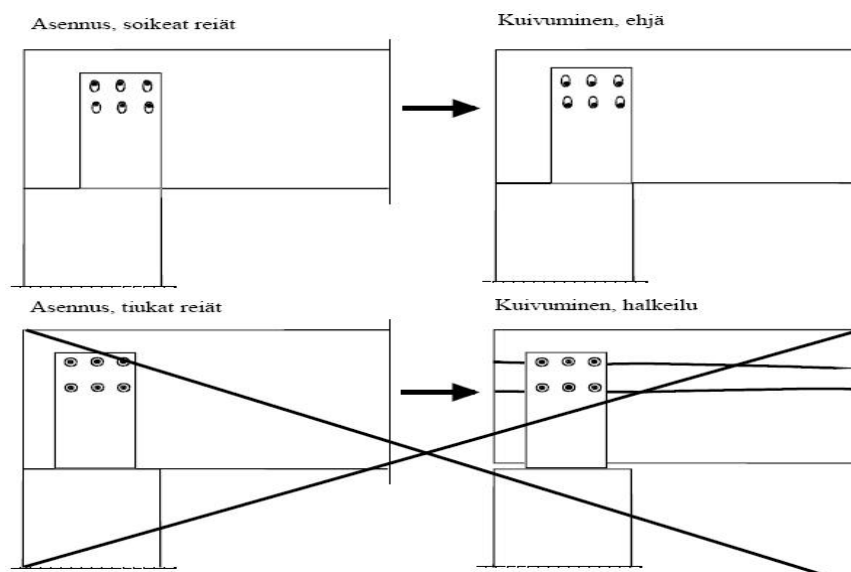
Palkin kuivuminen lisää halkeiluvaaraa. Lämmityskaudella palkit alkavat kuivua 10–12% valmistuskosteudestaan tai asennuksen aikaisesta kosteudesta käyttökosteuteen. Halkeamien syntymisen kannalta tämä kuivumisjakso on pahin, muulloin kuivumis- ja kostumissykkit seuraavat vuodenaikojen vaihtelua. Kosteusvaihtelujen muodonmuutokset jäävät esteettisiksi, jos niitä ei ole estetty. Estettäessä muodonmuutoksia halkeamat saattavat heikentää palkin kannattavuutta huomattavasti.

Palkin epätasainen kuivuminen on riski. Kuivuminen on nopeinta palkin päissä, loveuksissa ja reikien kohdilla, johtuen katkaistuista puun syistä. Halkeiluriskiä voidaan pienentää suojaamalla leikatut pinnat sopivalla kosteudensulkuaineella. (VTT 2006a, 11, 14.) Reikien aiheuttama vaurioriski on sitä suurempi, mitä lähempänä se on tukea (Kortesmaa 2006, 9).



KUVIO 28. Epätasaisen kuivumisen aiheuttamat halkeiluriskikohdat. (VTT 2006a, 14.)

Palkkia kiinnitettäessä tuelle on huomioitava, että teräsosat sijoitetaan mahdollisimman lähelle palkin sisäosaa ja teräsosien reiät tehdään soikeiksi ja kohdistetaan liitosten yläosaan.



KUVIO 29. Palkin liitos tuella, teräslevyillä ja pulteilla tehtynä (VTT 2006a, 12.)

Ulkona olevien rakenteiden halkeiluriski on huomattavasti suurempi kuin sisällä sateelta suojatuilla rakenteilla. Ulkona olevien rakenteiden pintaosissa on suuri kosteudenvaihtelu auringon ja sateen vaikutuksesta. Pinnoitetta käytettäessä on varmistettava, ettei kosteus pääse rakenteen sisään halkeilun vaikutuksesta. Kosteus ei pääse kuivumaan pinnoitteen suojavaikutuksen vuoksi, seurauksena saattaa olla rakenteen lahoaminen. (VTT 2006a, 14.) Pilarien ja kaarien päät eivät saa olla suorassa kosketuksessa betoniin tai hiekkaan. Pilarien päiden lahoamiseen ja liitosten teräsosien ruostumiseen johtaneet vauriot ovat olleet sadeveden, lumen sulamisen, maaperästä imeytyneen veden tai rakennuksessa käytetyn veden aiheuttamia. (VTT 2006b, 11.)

Halkeilun estämiseksi on myös huomioitava rakenteiden käyttötarkoituksen ja käyttöluokan muuttuminen. Rakenteen toimintatavan muuttuessa on suoritettava uudet rakennussuunnitelmat ja laskelmat. Rakennuksen muuttuessa lämpötilaltaan kylmästä lämpimäksi tai toisinpäin on huomioitava rakenteisiin vaikuttavat kosteus- ja lämpötilamuutokset. (VTT 2006a, 14–15.)

Halkeamien estämiseksi on erittäin tärkeää rakennustyön hallinta. Tärkeää on siis kosteudenhallinta, jotta valmistus- ja käyttökosteuden välinen muutos ei aiheuttaisi halkeilua. Puurakenteiden nostossa ja kuljetuksessa on huomioitava elementteihin mahdollisesti kohdistuvat kuormitustapaukset, nämä asiat tulee ottaa huomioon jo rakennesuunnittelussa tuennan ja nostokiinnitysten suunnittelulla. Tuennat on periaatteessa tehtävä niille kohdin missä ne valmiissa rakennuksessakin tulevat. Kuljetuksessa ja työmaalla säilönnässä elementtien suojaus on tärkeää, jotta kosteus ei pääsisi imeytymään palkkeihin, vaikka kosteuden siirtyminen ei olekaan kovin nopeaa. Erityisesti on huolehdittava siitä että kosteus ei pääse kerääntymään kotelorakenteisiin tai liitoksiin. (VTT 2006a, 15–16.)



KUVIO 30. Puuhallin kokoaminen (Puuinfo OY 2007, 24.)

5.2.2 Halkeamien vaarallisuus

Halkeamien vaarallisuuteen vaikuttavat niiden koko ja haljenneelle alueelle kohdistuva rasitus. Liimapuussa esiintyvät tyypilliset halkeamat ovat suuruusluokaltaan 10 mm syviä ja korkeintaan noin metrin pituisia, nämä ovat yleensä vain ulkonäköhaitallisia kuivumishalkeamia. Vedettyjen ja puristettujen palkkien, esimerkiksi pilarien halkeamat, ovat yleensä vaarattomampia kuin palkkien, koska kohdistuvat voimat ovat pituussuuntaisia.

Puhtaasti vedettyjen rakenteiden kantavuuteen halkeilulla on merkitystä, vain jos ne esiintyvät liitosalueella, jossa ne heikentävät liitoksen kestävyyttä.

Puristusrasituksessa suuret halkeamat saattavat vaikuttaa nurjahduskapasiteettiin. (VTT 2006a, 17–18.) Pilareihin kohdistuessa vaakakuormitusta, esimerkiksi tuulikuormaa, voivat halkeamat olla vaarallisia (Kortesmaa 2006, 5).

Taivutetuissa rakenteissa halkeamat voivat olla vaarallisia, jos ne esiintyvät suurten leikkausrasitusten alueella. Esimerkiksi yksiaukkoisen tasakorkean palkin tuen lähetyvillä palkin korkeuden keskiosassa. Syitä vastaan kohtisuorat kuormat ovat pääsääntöisesti aina vaarallisia. (VTT 2006a, 17–18.) Kaikki pilarien tai palkkien läpimenevät halkeamat ovat vaarallisia. Halkeamien syvyyden mittauksessa voi apuna käyttää rakotulkkia tai ohutta ja jäykkää liuskaa (VTT 2006b, 15). Liimapuupalkin ala ja yläosassa olevat halkeamat ovat vaarattomia. Palkin ollessa halki koko matkalta sen kuormituksen kantokyky on alentunut merkittävästi, tällöin rakennetta on käsiteltävä kahtena eri palkkina. (Kortesmaa 2006, 3.)

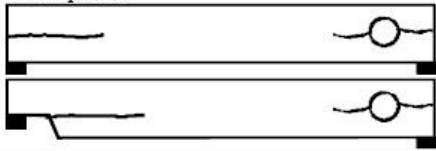
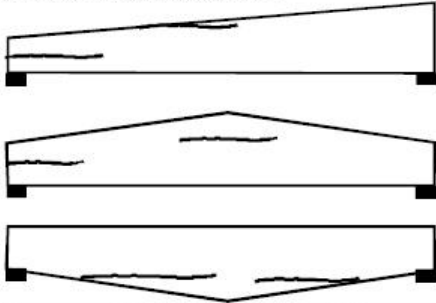
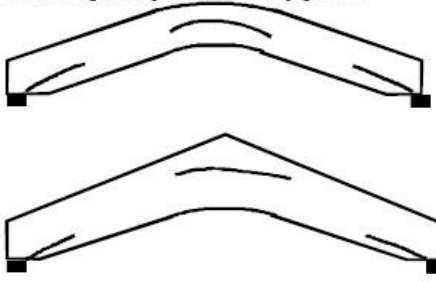


KUVIO 31. Kolme eri halkeamatilannetta (Kortesmaa 2006, 3.)

5.2.3 Vaaralliset vauriokohdat kannatintyypeittäin

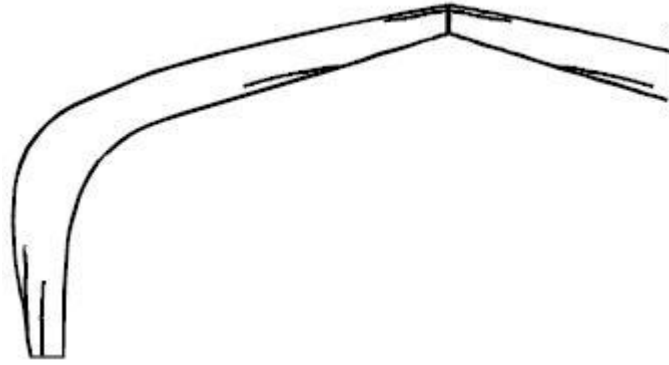
Erilaiset liimapuurakenteet määräävät niiden vaarallisimmat vauriokohdat.

Kuviossa 32 on esitelty tyypillisten liimapuupalkkien vaarallisimmat halkeamakohdat.

| Kannate | Vaarallisimmat halkeamat |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Suora palkki</p>  | <ol style="list-style-type: none"> 1. Palkin päässä suunnilleen korkeuden puolivälissä 2. Reiän ympäristössä 3. Tuen lähellä olevan loveuksen juuressa silloin, kun loveus on palkin alareunassa |
| <p>Pulpettipalkki ja harjapalkki:</p>  | <ol style="list-style-type: none"> 1. Pulpettipalkin matalassa päässä suunnilleen korkeuden puolivälissä ja palkin yläreunassa 2. Harjapalkissa palkin päässä suunnilleen korkeuden puolivälissä ja harjan alueella 3. Käännetyissä harjapalkissa lisäksi koko alareunassa silloin, kun alareunassa lamellit on leikattu vinosti syiden suuntaan nähden |
| <p>Kaareva palkki ja kaareva harjapalkki</p>  | <ol style="list-style-type: none"> 1. Kaarevassa palkissa jännevälin keskellä, tukien lähellä erityisesti silloin, kun alareunan lamellit on katkaistu ennen niiden ulottumista tuelle 2. Kaarevassa harjapalkissa eli bumerangipalkissa jännevälin keskellä tukien lähellä erityisesti silloin, kun alareunan lamellit on katkaistu ennen niiden ulottumista tuelle. Bumerangipalkin keskiosa on tavallista kaarevaa palkkia herkempi halkeilulle. |

KUVIO 32. Liimapuurakenteiden vauriokohdat (Kortesmaa 2006, 4.)

Palkkien halkeamien vaarallisuutta vaikeampaa on määritellä liimapuukehien halkeamien vaarallisuus. Jos ulkoreunassa olevat lamellit on katkaistu vinosti syysuuntaan nähden, ulkoreunalla olevat halkeamat voivat olla vaarallisia. Puiden ollessa kontaktissa harjaliitoksen yläreunassa ja alareunan ollessa raollaan, harjalla oleva halkeama on vaarallinen. Palkin alapuolella oleva halkeama voi olla vaarallinen, jos kehän palkkiosan alareuna on sahattu vinosti syysuuntaan nähden. (Kortesmaa 2006, 5.)



KUVIO 33. Kolminivelkehän halkeamien vaarallisimmat kohdat (Kortesmaa 2006, 5.)

6 KORJAUSMENETELMÄT

6.1 Korjaustarpeen arviointi ja ajankohdat

Halkeilun aiheuttaessa rakenteellisen riskin, on korjaus aina tarpeen. Riskin arvioinnissa on otettava huomioon vaurioituneen alueen rasitukset ja niiden suuruudet. (VTT 2006a, 18.) Vaurioita analysoitaessa niistä tulee teettää arvio ja korjaussuunnitelma rakennesuunnittelijalla. Vaurioiden luonteet ovat usein erilaisia, eivätkä niiden korjaustavat ole yksiselitteisiä. (Kortesmaa 2006, 11.)

Korjaus- ja vahvistustoimenpiteille voidaan asettaa vaihtoehtoiset ja toisiaan täydentävät tavoitteet. Näitä ovat rakenteen ulkonäön ja alkuperäisen materiaalin säilyttäminen, alkuperäisen kantavuuden palauttaminen tai lujuusominaisuuksien lisääminen ja muuttaminen alkuperäistä vahvemiksi ja ennen kaikkea turvallisuutta koskeviin säännöksiin muokkaaminen. Korjaustoimenpiteisiin vaikuttavat myös taloudelliset seikat, tulevien vaurioiden ennakoiminen sekä käytettävissä oleva aika ja materiaali. (Puurakenteet STEP 2 1998, 49–50.)

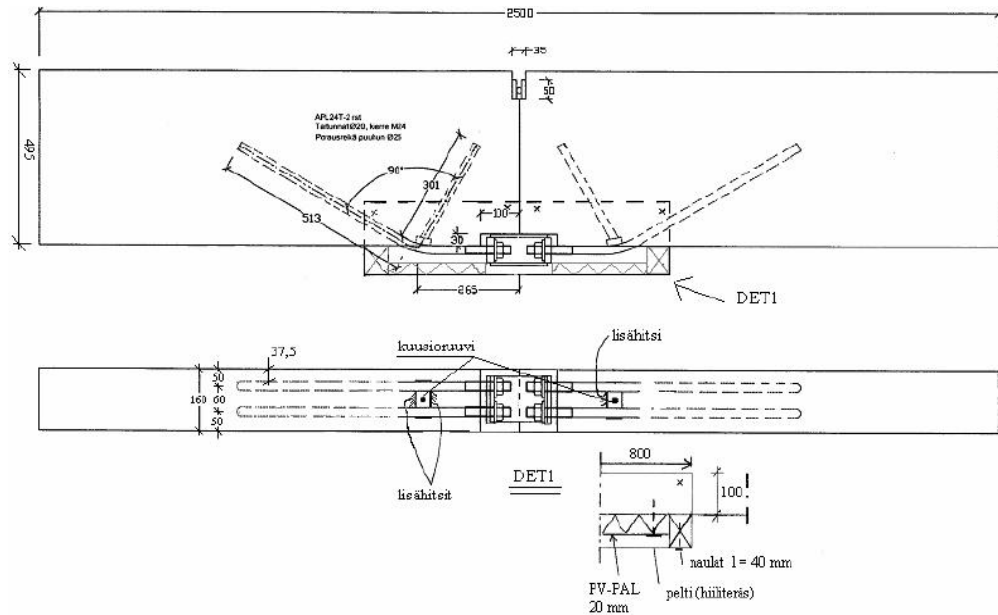
Vaurioituneelle alueelle tulevat todelliset kuormat määräävät rasitukset. Kuormina käytetään viranomaisten määräämiä vähimmäisrasituksia. Laskelmissa on erityisesti selvitettävä leikkausrasitukset ja vetorasitukset syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Kuormitusten aiheuttamia rasituksia verrataan vastaaviin kapasiteettiarvoihin, jolloin saadaan käyttöasteet. Vaurion suuruutta arvioitaessa on oleellista selvittää halkeaman syvyys, pituus ja paikka. Halkeaman ollessa samalla kohdalla molemmin puolin, syvyydeksi otetaan niiden summa. Mittaaminen tapahtuu rakotulkilla tai muulla ohuella ja jäykällä liuskalla. Syvyyden arvioinnissa on syytä käyttää niin sanottua varmuuskerrointa, koska halkeaman todellisen syvyyden arviointi on käytännössä mahdotonta. (VTT 2006a, 18.)

Kapasiteetin käyttöasteen ylittäessä heikentyneen rakenteen mitat, on korjaus tarpeen. Korjauksen ajankohta määräytyy tapauskohtaisesti, mutta yleensä korjaus pyritään tekemään niin sanottuna kuormattomana ajankohtana, esimerkiksi kesällä. Halkeamien kannalta korjaus ennen lämmityskauden alkua on sopiva ajankohta. (VTT 2006a, 19.)

6.2 Korjausmenetelmät

Liimapuorakenteen menettäessä lujuusominaisuutensa lahon tai halkeaman vaikutuksesta, ei alkuperäistä lujuutta voida palauttaa esimerkiksi kyllästämällä tai muulla menetelmällä. Rakenneosa voidaan korjata, vahvistaa tai jäykistää tarpeen mukaan. (Puurakenteet STEP 2 1998, 52.)

Vaurioituneille alueille porattuihin reikiin liimatut terästangot toimivat vinotankoina. Näistä tarkemmat ohjeet löytyvät puurakenteiden suunnitteluohjeista RIL 120. Vinotankoliitos muodostuu kahdesta toisiinsa nähden vinosti liimatuista terästangoista, jotka ovat kiinnitetty toisiinsa yhtenäiseksi kokonaisuudeksi. Teräsrakenteiden teräsosat mitoitetaan suunnitteluohjeiden mukaan, liitosten valmistajilla tulee olla erillinen todistus osaamisesta ja laitteiston sopivuudesta. (VTT 2006a, 19.)



KUVIO 34. Vinotankoliitoksen rakennekuva (Oksanen, Kevarinmäki, Yli-Koski, & Kaitila 2005.)



KUVIO 35. Vinotankoliitos (Oksanen ym. 2005.)

Vaurioituneen alueen vahvistaminen voidaan tehdä myös vaneroinnilla, jolloin vaurioituneelle alueelle palkin kylkiin tehdään ruuviliimatut vanerivahvistukset. Itseporautuvilla ruuveilla saadaan liimaukseen vaadittava puristus, naulausta eikä varsinkaan konenaulausta saa käyttää. Liimaukseen sopivat täyttävät liimat, kuten epoksi- ja polyuretaaniliimat. Koepalan liimaus on suositeltavaa tehdä ennen

varsinaista liimausta, jotta voidaan testata murtuma. Koe on onnistunut, jos murtuma tapahtuu puusta eikä liimasaumasta. (VTT 2006a, 20.)

Erilaiset kuitumateriaalit, kuten lasi-, arami- ja hiilikuitu, sopivat myös liimapuurakenteiden vahvistusmateriaaleiksi polyesteri ja epoksiliiman kanssa. Ne toimivat lisäksi esteettisinä materiaaleina ja ovat halpoja ja helppoja liimata. (Puurakenteet STEP 2. 1998, 162.) Jos liimapuupalkki jää liitoksestaan ilmaan roikkumaan kiinnikkeiden varaan, voidaan rakoon kiilata esimerkiksi tukipinta-alan kokoinen vaneri- tai teräslevy (VTT 2006a, 12).

Kaarevien harjapalkkien ja palkkien vaurioista on olemassa monia esimerkkejä, mutta harvoin nämä rakenteet ovat sortuneet kokonaan. Palkkien korjaaminen on kokeiden ja kokemusten pohjalta verrattain helppoa. Täyttämällä halkeama liimalla, nostamalla rakennetunkeilla ja lujittamalla se vahvistuksella saadaan toimiva rakenne. (Puurakenteet STEP 2. 1998, 163.)

Täysin ulkotiloissa olevat liimapuurakenteet, kuten sillat ovat yleensä halkeilleet kosteusvaihteluiden ja auringonpaisteen aiheuttamina. Suolakyllästetyissä palkeissa halkeilu on yleisempää kuin kreosootilla kyllästetyissä. Liikennekuormat eivät yleensä ole siltojen halkeamien aiheuttajia, vaan syynä on valmistusvirhe tai liiman vanheneminen. Halkeamien korjaamiseen sopii injektointi, joka tehdään epoksilla tilaajan hyväksymän injektointisuunnitelman mukaan. Injektointi ei sovi uudehkoihin kreosootilla kyllästettyihin palkkeihin. Injektointi on tarkka toimenpide, jossa työntekijän on osoitettava ammattitaitonsa tilaajan hyväksymällä työnäytteellä tai ammattipassilla. (Tiehallinto 2005.)

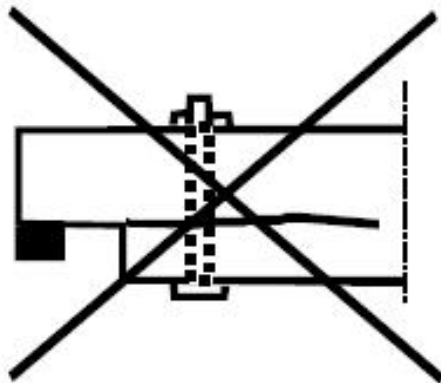
Injektoinnissa palkin pinta on puhdistettava halkeaman kohdalta kevyesti hiomalla. Sulkuaineena halkeaman päälle käytetään liimattavaa injektioaineen kestävää erikoisvahvistettua teippiä, johon tehdään injektiopumppauksen ajaksi reiät joiden kautta epoksi levitetään rakenteeseen. Vaihtoehtoisesti voidaan myös käyttää injektointitulppaa, jolloin halkeamaan porataan reikä, johon tulppa lyödään tuurnalla. Injektointikohdat sijoitetaan vuorotellen palkin molemmille puolin siten, että niiden etäisyys palkin pituussuunnassa on enintään 1,5 kertaa

palkin leveys. Injektoinnissa käytetään apuna käsikäyttöistä puristinta tai konekäyttöistä pumppua. (Tiehallinto 2005.)

6.3 Virheelliset korjausmenetelmät

Olemassa on myös niin sanottuja virheellisiä korjaustapoja jotka sisältävät tunnistettavia riskejä. Tällaisten rakenteiden ilmentyessä on ne luokiteltava riskialttiiksi. Halkeamien täyttöä liimaamalla puutikkuja tai kittaamalla ei ole kantavan rakenteen korjausta. Liimatut puutikut eivät koskaan ulotu halkeaman pohjaan, mekaaninen pakottaminen saattaa jopa lisätä halkeiluvaaraa. Varsinkin puun kosteuden olleessa erilainen sisä- ja ulkopuolella halkeilun vaaraa lisääntyy. (Kortesmaa 2006, 12.)

Pulttaamalla tehtyjen korjausten suurin riskitekijä ovat kosteudenmuutokset korjauksen jälkeen. Syitä vastaan kohtisuoraan asetetut pultit ottavat vastaan voimia vasta kun puiden välillä on selvää liukumaa eli silloin, kun puuosat ovat murtuneet kokonaan kahdeksi eri osaksi, tällöin kantavuus on riittämätön ja taipuma niin suuri, että rasitukset ovat siirtyneet seuraaville palkeille. (Kortesmaa 2006, 12.)



KUVIO 36. Pulttaus on virheellinen korjaustapa (Kortesmaa 2006, 12.)

7. LIIMAPUURAKENNEKOHTTEIDEN VAURIOANALYYSI

7.1 Liimapuurakenteiden analysoinnin tarkoitus ja tavoitteet

Rakenteiden analysoinnin tavoitteena on selvittää valittujen kohteiden vauriolaadut ja niiden sijainnit. Saadut tulokset auttavat kiinteistönomistajia selvittämään kohteidensa vauriotason, jolloin he pystyvät suunnittelemaan mahdolliset korjaus- tai huoltotoimenpiteet. Rakennevaurioanalyysin tarkoituksena on myös selvittää liimapuurakenteiden yleistä toimivuutta ja laatutasoa.

7.2 Tutkimuksen suorittaminen ja kuvauskohteiden valinta

Vaurioanalysointi ja rakenteiden tutkiminen suoritettiin silmämääräisellä tarkastelulla. Apuna tarkastelussa ja kohteiden dokumentoinnissa käytettiin Panasonic DMC-FX9 – digikameraa. Tutkimuskohteiden valinta tapahtui osin sattumanvaraisesti ja osin kohteissa esiintyvien vaurioiden vuoksi. Kohteiden valintaan vaikuttivat myös rakenteiden runkojärjestelmät, iät ja vauriotasot. Kuvauskohteet sijaitsivat kaikki Päijät-Hämeen seudulla. Rakenteiden kuvaukset tehtiin aikavälillä 12.2.2007- 13.3.2007.

TAULUKKO 7. Tutkimuskohteet

| Kohde | Paikka-kunta | Tarkastus-päivä | Jänneväli | Rakennus-vuosi | Rakennetyyppi |
|----------------------|------------------|-----------------|-----------|----------------|----------------------------|
| Suvituuli | Sysmä | 12.2.2007 | 30 m | 1996 | Harjapalkki |
| S-Market | Hollola | 19.2.2007 | | | Arina |
| K-Rauta | Lahti/Laune | 16.2.2007 | | 1987 | Harja- ja suorapalkkiarina |
| Kunnan kirjasto | Hartola | 12.2.2007 | | 1987 | Suorapalkki |
| Toimintakeskus Olavi | Sysmä | 12.2.2007 | 23 m | 2005 | Kaaripalkki |
| Lahden Mittaovi Oy | Nastola/Villähde | 13.3.2007 | | 1985 | Käännetty harjapalkki |
| ABC-liikennemyymälä | Nastola/Villähde | 19.2.2007 | | | Ristikko |
| Unikulma | Lahti | 13.2.2007 | | 1988 | Kaaripalkki |
| Stemma -myymälä | Lahti | 13.2.2007 | | 1988/1989 | Loiva pulpettipalkki |
| S-Market | Lahti/Hennala | 19.2.2007 | | | Suorapalkki |
| S-Market | Lahti/Ankkuri | 19.2.2007 | | | Suorapalkki |

Kun kuvauskohteista löydettiin halkeamia tai muita vaurioita ne kuvattiin siten, että niistä näkyi vaurioiden sijainti ja laajuus. Näin kuvien silmämääräinen analysointi oli mahdollista jälkeenpäinkin. Kuvissa ilmenneet vauriot kirjattiin ja niiden vakavuus selvitettiin Puurakenteiden halkeilun hallinta ja Liimapuun halkeilu – Ohje riskien ja korjaustarpeen arviointiin oppaiden avulla. Rakenteiden analysoinnissa ei voitu tutkia halkeamien syvyyttä, koska rakenteet sijaitsivat sellaisella korkeudella, että avuksi olisi tarvittu tikapuut tai nosturi.

7.2.1 ABC – Liikennemyymälä, Nastola

Villähteellä sijaitseva ABC – Liikennemyymälän kattorakenteena toimii liimapuinen ristikkorakennelma. Ristikkoliitokset olivat tehty puisilla tapeilla. Kuvauskohteesta ei löytynyt liimapuurakenteen vaarallisissa kohdissa esiintyviä halkeamia, eikä muita turvallisuuteen liittyviä vaurioita. Kattovalojen, ilmastointien ja mainoskylttien ripustusliitoksissa ei havaittu vaurioita.



KUVIO 37. ABC – Liikennemyymälän ristikkorakenne ja liitos

7.2.2 Kunnan kirjasto, Hartola

Hartolan kunnan kirjasto on vuonna 1987 valmistunut rakennus, jonka pääpalkisto on suunniteltu tasapalkkeina ja rakennuksen kulmat toteutettu viuhkamuotoisina liimapuukurakennelmina. Kohteessa esiintyi halkeamia, joiden syntyminen on kosteudenvaihteluiden aikaansaamaa. Kuviosta 38 havaitaan, että pilarilla lepäävä palkki on haljennut suurimmalta osin liimasaumastaan, noin neljän metrin matkalta ja 10 cm korkeudelta palkin alareunasta. Halkeama ei kuitenkaan ole läpimenevä ja koska se ei esiinny palkin korkeuden suhteen keskiosassa, jossa on suurimmat leikkausjännitykset, sillä ei ole turvallisuuteen liittyvää vaikutusta.



KUVIO 38. Tasapalkin alareunan halkeama

Kohteesta löydettiin myös muutamia ripustus- ja pulttiliitosten aiheuttamia halkeamia, joiden suuruus havaitaan kuvioista 39. Ripustusliitosten aiheuttamat halkeamat sijaitsivat palkkien alapinnoilla, joten halkeamat eivät vaikuta lujuuteen, niistä voi olla ainoastaan esteettistä haittaa. Pulttien aiheuttamat halkeamat eivät ole haitallisia, koska palkit ovat tuettu alapinnastaan eikä tukien välinen etäisyys ole suuri.



KUVIO 39. Ripustus – ja pulttiliitoksien aiheuttamat halkeamat

7.2.3 K-Rauta, Lahti

Lahden Launeen K-Raudan vuonna 1987 valmistuneet kattorakenteet ovat arinarakenteen muotoiset, joissa sekundääripalkit ovat lovettu primääripalkkeihin tukevin liitoksin. Tukevien liitosten vuoksi harjapalkkeihin ei ole syntynyt halkeamia. Kohteessa esiintyi muutamia kuivumishalkeamia, pääosin palkkien alapinnoilla. Palkkien sivupinnoilla esiintyneet halkeamat eivät olleet suurilla jännitysalueilla eivätkä sijainneet liimasaumoissa.



KUVIO 40. Pilari-palkkiliitos ja sekundääripalkin liitos primääripalkkiin



KUVIO 41. Arinarakenne

7.2.4 Lahden Mittaovi Oy, Nastola

Lahden Mittaovi Oy on keittiökalusteiden ja muiden kiintokalusteiden valmistamiseen erikoistunut yritys, jonka tuotantotilojen kattorakenteet ovat valmistuneet vuonna 1985. Tuotantotilojen lämmitys on järjestetty ympäri vuoden samanlaiseksi, joten kuivumiskutistumisen aiheuttama halkeilu ei ollut laajaa.

Muutamit liimapuupilarit ovat joutuneet kosketuksiin veden kanssa, tämän vaikutukset voidaan havaita kuvioista 42. Riittävän ilmanvaihdon vuoksi kosteus ei ole kuitenkaan aiheuttanut lahoamisvauriota palkkiin.



KUVIO 42. Kosteuden vaikutus pilariin

Vaikka kohteessa oli nurin käännetty harjapalkki eli mahapalkki, jossa oli vinosti leikatut lamellit, ei vedetyllä reunalla sijaitsevissa lamelleissa havaittu halkeamia. Yleisesti mahapalkki, jossa on vinosti leikatut lamellit, on vaarallinen, koska taivutusjännitys, leikkausjännitys ja syitä vastaan kohtisuora vetojännitys osuu samaan alareunan pisteeseen.



KUVIO 43. Nurin käännetty harjapalkki

7.2.5 Olavin toimintakeskus, Sysmä

Sysmässä sijaitseva Olavin toimintakeskus on valmistunut keväällä 2005. Liikuntasali Päijänne Areenan kattorakenteet ovat valmistettu liimapuisista kaaripalkeista jotka ovat tuettu korkeilla pilareilla. Näin on saatu liikuntasalille toimiva rakennekorkeus. Rakenteissa havaittiin halkeamia ainoastaan sivuhuoneen suorissa palkeissa. Halkeamat olivat pieniä kuivumishalkeamia, jotka eivät ole lujuustarkastelun kannalta haitallisia.



KUVIO 44. Olavin toimintakeskuksen kaaripalkit ja liitos

7.2.6 S- Market Ankkuri, Lahti

Lahden Ankkurissa sijaitsevan S-Marketin kattorakenteiden pääpalkisto on tasakorkeaa liimapuuta. Pääpalkistoon on liitetty loveuksella kohtisuoraan jänneväliä sekundääripalkit. Loveuksien reunoihin on kiinnitetty tapeilla tukipalikat. Rakenne muistuttaa liitoksiltaan Launeen K-Raudan kattorakennetta.



KUVIO 45. S-Market Ankkurin pilari-palkkiliitos ja sekundääripalkkien loveus pääpalkkiin

S-Marketin kattorakenteet olivat vauriottomat. Kannatinpilareissa esiintyi muutamia pieniä kuivumishalkeamia. Pilareiden halkeamat eivät ole vaarallisia, koska kohdistuvat voimat ovat pituussuuntaisia.

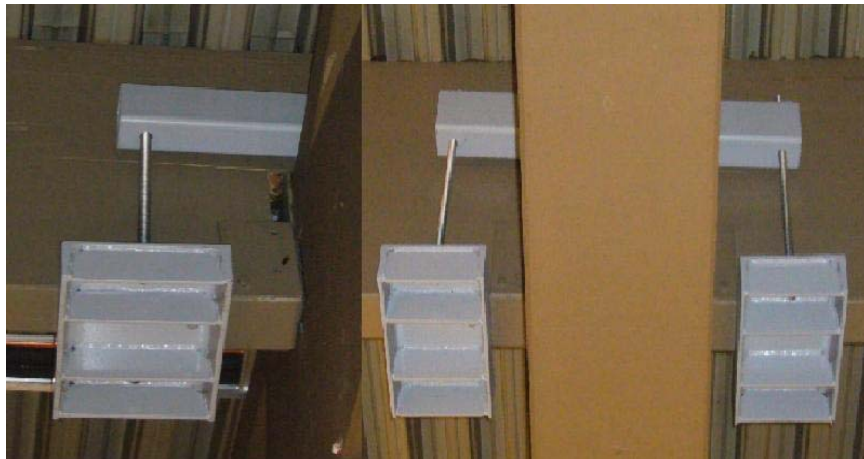
7.2.7 S-Market Hennala, Lahti

Lahden Hennalan S- Marketin kattorakenteena toimivat liimapuu- ja jännebetonipalkkien yhteisrakenne. Liimapuupalkit olivat tuettu päistään loveamalla jännebetonipalkkien varaan. Kannatuksessa oli käytetty teräskonsolia, joka oli ripustettu jännebetonipalkin päältä. Liimapuissa esiintyi yleisesti halkeamia, jotka alkoivat loveuksen reunasta ja vaihtelivat pituudeltaan 0,5–1,5 metriin.

Vauriot ovat havaittu ja ne on tuettu teräksisillä tuilla. Jännebetonipalkin päältä kulkevat tuet nostattavat vaurioituneita liimapuupalkkeja. Kohde on hyvä esimerkki erilaisten korjaus- ja tuentamenetelmien tapauskohtaisuudesta.

Palkit ovat todennäköisesti haljenneet kosteusvaihteluiden ja leikkauslujuuksien ylittämisen vuoksi. Palkkien päissä on tapahtunut kosteuselämistä korkeussuunnassa eivätkä teräskonsolit ole estäneet palkkien liikehdintää.

Kuviosta 46 havaitaan uusi harmaan värinen tuenta ja vanha ruskean värinen teräskonsoli sekä halkeaman sijainti loveuksen reunassa.



KUVIO 46. Halkeama loveuksen reunassa ja uuden tuennan kiinnitysmekanismi

Kohteen muutamat loviliitokset ovat vielä ilman uutta lisätuenta, lisäksi muutamissa palkeissa oli havaittavissa normaaleja kuivumishalkeamia. Näiden sijainnit eivät olleet rakenteen toimivuuden kannalta oleellisissa paikoissa.

7.2.8 S-Market, Hollola

Hollolan S- Marketin halkeamat olivat tiedossa jo ennen kohteen kuvausta. Kantavat kattorakenteet ovat muodostettu tasakorkeiden liimapuupalkkien ja betonisten pilareiden avulla. Pilareiden päältä lähtee palkistoa neljään eri suuntaan. Liimapuupalkit on pintakäsitelty valkoisella maalilla, lisäksi

muutamien palkkien päissä havaittiin erillinen pintakäsittely. Halkeamien esiintyminen oli hyvin helposti havaittavissa, koska valkoinen maali korostaa tummat halkeamat liimapuusta.



KUVIO 47. Kuivumishalkeamia Hollolan S-Marketin juomaosaston liimapuussa

Palkkien alapinnoista löytyi paljon halkeamia, mutta niillä ei ole vaikutusta palkin leikkaus- tai taivutusjännityksen heikkenemiseen. Teräskenkäliitoksien pultit eivät olleet aiheuttaneet halkeamia palkkeihin. Palkin ja liitoksen pohjan väliseen tilaan on laitettu täytettä, jolloin palkin kosteuselämisestä ei ole syntynyt halkeamia pulttien kohdalle.



KUVIO 48. Teräskenkäliitos ja halkeama palkin alapinnassa

Kuvioista 49 ja 50 havaitaan palkkiin poratun reiän aiheuttama halkeama. Halkeama ei ole kuitenkaan mennyt kokonaan läpi palkista, joten se ei ole vaarallinen. Halkeamat sijaitsevat palkin keskiosassa noin 15 cm korkeudella alapinnasta. Raskaan ripustuskuorman lisääminen palkin alapintaan on vaarallista, koska halkeama heikentää palkin syitä vastaan kohtisuoraa vetolujuutta entisestään.



KUVIO 49. Reiän aiheuttama halkeama palkissa



KUVIO 50. Reiän aiheuttama halkeama palkissa

Ripustusliitokset saattavat aiheuttaa halkeamien syntymisen alapintoihin, kuten kuvioista 51 havaitaan. Syntynyt halkeama ei heikennä palkin lujuutta, mutta liitoksen kiinnitys voi halkeaman vuoksi olla heikko.



KUVIO 51. Halkeama palkin alapinnassa ripustuskuormakiinnityksen juuressa

Kohteessa havaittiin huomattavan paljon halkeamia, jotka sijaintinsa ja muotonsa vuoksi tulkitaan vaarattomiksi kuivumishalkeamiksi. Palkistojen päissä havaittujen pintakäsittelyjen oletetaan olevan kosteudensulun vuoksi. Myymäläpäällikkö Riitta Elfin mukaan juomaosaston puoleisen katon liimapuupalkiston halkeamat ovat seurannassa, jossa niiden etenemistä tarkkaillaan mittalaitteiston avulla.

7.2.9 Stemma – myymälä, Lahti

Lahdessa sijaitsevan viihdyttävän huonekaluliikkeen kattorakenteena toimivat hyvin loivista pulpettipalkeista rakennetut liimapuupalkistot. Jokaiselle teräsbetonipilarille on kiinnitetty neljä liimapuupalkkia siten, että molemmin puolin on palkkiparit. Samalla puolen olevien palkkien etäisyys on toisistaan noin 10 cm, palkkien väli on koteloitu. Palkit on liitetty pilareihin teräskengillä. Liitoskiinnityksessä ei ole käytetty pultteja.

Muutaman palkin tuen lähetyvillä havaittiin halkeamia, mutta niiden sijainnit eivät olleet suurten leikkausjännitysten alueella. Halkeamat sijaitsivat ensimmäisen tai toisen lamellin liimasauman kohdalla ja olivat noin 0,5–1,0 metriä pitkiä.



KUVIO 52. Halkeamia palkkien tukien lähetyvillä

Kahdessa kohteen yläkerrassa sijaitsevassa liimapuupalkissa esiintyivät pitkät halkeamat, jotka kulkivat noin 10–15 cm korkeudella palkin alapinnasta tuelta tuelle. Teräskenkäliitoksien vuoksi halkeamien jatkumista palkkien päähän asti ei pystytty tarkastamaan. Lisäksi halkeamia palkkien toisella puolen ei havaittu, palkkien välisen raon koteloimisen, palkkien sijaintikorkeuden ja heikon valaistuksen vuoksi. Palkin halkeamat saattavat olla vaarallisia ripustuskuormien vuoksi, koska palkit ovat menettäneet syitä vastaan kohtisuoraa vetolujuuttaan. Vaurioituneiden palkkien vieressä sijaitsevat palkit ovat kuitenkin ehjiä.



KUVIO 53. Palkin alareunassa sijaitseva pitkä halkeama

Kohteen muut halkeamat olivat tyypillisiä kuivumishalkeamia, jotka sijaitsivat palkkien alapinnoilla ja hajanaisesti sivupinnoilla. Sivupinnan halkeamat eivät esiintyneet liimasaumoissa. Ripustusliitoksissa ei havaittu halkeamia.

7.2.10 K-Market Suvituuli, Sysmä

Vuonna 1996 Sysmään rakennetun K-Market Suvituulen liimapuुरakenteena toimivat massiiviset harjapalkit 30 metrin jännevälillä. Liimapuupalkistossa ei havaittu mitään rakenteen ikäluokkaan kuulumatonta halkeilua. Havaitut halkeamat olivat pääasiassa palkkien alapinnoilla. Ainoastaan yhden ripustusliitoksen kiinnitys oli aiheuttanut pienen halkeaman erään palkin sivupintaan. Suvituulen liimapuुरakenteet ovat tutkimuskohteista massiivisimmat. Rakenteet ovat hieno esimerkki toimivista, pitkällä jännevälillä rakennetuista yksiaukkoisista liimapuुरakenteista.



KUVIO 54. K-Market suvituulen liimapuinen harjapalkki

7.2.11 Unikulma, Lahti

Lahden keskustassa sijaitseva Unikulma on rakennettu vuonna 1988. Unikulman kattorakenteet ovat kaarevaa liimapuuta, joiden toinen pää ulottuu toimitilan ulkopuolelle. Liimapuuta oli pintakäsitelty valkoiseksi, joten halkeamat havaittiin helposti myös korkeimmista kohdista.

Palkkien alapinnoilta ja alatukien lähetyviltä havaittiin normaaleja kuivumishalkeamia. Kaaripalkkeihin oli tehty sähköjen läpiviemiseksi reikiä, mutta niihin ei ollut muodostunut halkeamia. Palkin pituuden keskialueella ja noin 30 cm korkeudella alapinnasta oli halkeama, joka on todennäköisesti muodostunut taivutusmomentin pyrkimyksestä oikaista palkkia.



KUVIO 55. Halkeama kaaripalkin keskialueen lähetyvillä

Palkkien ylätuen alueella oli huomattavan paljon halkeamia. Kosteusvaihtelut ovat aiheuttaneet palkeille halkeamia, koska palkkien ulkona ja sisällä sijaitsevat osat ovat eri ilman kosteudessa. Halkeamat ovat syntyneet palkkien hakiessa tasapainokosteuttaan ympäröivän ilmankosteuden vuoksi.



KUVIO 56. Kosteusvaihteluiden aiheuttamat halkeamat

Palkit olivat kiinnitetty ylätuella jäykällä pulttiliitoksella. Liitoksien joustamattomuus oli saanut palkit halkeamaan niiden kosteusvaihteluiden vuoksi. Osa palkeista oli haljennut samalta kohdilta molemmilta puolin. Tuen ollessa hyvin korkealla ei ollut mahdollisuutta tutkia rakojen syvyyttä tarkemmin. Tässä tilanteessa tulee tarkistaa, onko rakenteiden lujuuslaskennat suoritettu oikein ja seurata kyseisten halkeamien etenemistä. Halkeilun eteneminen saattaa johtaa korjaustoimenpiteisiin.



KUVIO 57. Halkeama jäykässä pulttiliitoksessa

7.3 Yhteenveto tutkimuskohteiden vauriokartoituksesta

Kuvauskohteista selkein huomattava asia oli kuivumishalkeamien määrä.

Useimmiten ne sijaitsivat palkkien alapinnoilla. Sivupinnoilla sijainneet kuivumishalkeamat olivat pieniä, ne sijaitsivat lamelleissa. Kuivumishalkeamat erottuivat niiden sijainnin ja luonnollisen koon vuoksi.

Tutkimuskohteisiin kuului eri vuosikymmenien rakennelmia, joten ajan vaikutus halkeamien määrään oli helppo havaita. Halkeamien määrän kasvaminen oli selkeästi havaittavissa vanhemmissa rakennuksissa. Viimeisen kymmenen vuoden aikana rakennetuissa rakenteissa halkeamien määrä oli huomattavasti pienempi.

Halkeamien määrään vaikuttivat myös käyttökohteen olosuhteet.

Liimapuurakenteiden käyttökosteuden muutokset eri kuvauskohteissa oli havaittavissa halkeamien määrästä. Sääolosuhteiden ja ilmankosteuden muutoksilla oli erilaiset vaikutukset esimerkiksi Unikulman ja Lahden Mittaovi Oy:n liimapuurakenteisiin. Mittaovella sanottiin tehtaan lämpötilan olevan ympäri vuoden samanlainen. Sään vaikutus Unikulman liimapuurakeisiin oli tehokkaampi, koska palkkiin vaikutti sisä- ja ulkoilma samaan aikaan. Kuvauskohteiden palkkien päissä havaittiin myös tavanomaista enemmän halkeamia, joka johtui epätasaisesta kuivumisesta. Päiden halkeilun vähentämiseksi kosteudensulkuaineen käyttö on suotavaa.

Erilaiset ripustusliitokset ja kiinnitykset olivat aiheuttaneet hyvin monessa kohteessa liimapuupalkkeihin halkeamia. Puun eläessä jäykän liitoksen tai kiinnityksen ympärillä syntyy helposti halkeamia. Näiden halkeamien vähentämiseksi tulisi kosteudenvaihteluihin kiinnittää enemmän huomiota. Kaikkia halkeamia ei voida kuitenkaan välttää joten rakennesuunnittelussa tulisi huomioida, että liitoksista syntyvät halkeamat eivät sijaitsisi suurten jännitysten alueilla.

Halkeamien määrä liimasaumoissa ei ollut yleistä. Useimmiten halkeamat alkoivat lamelleista ja kulkivat vain osittain liimasaumassa. Tästä voidaan päätellä, että liimausvirheet eivät ole kovin yleisiä laadunvalvonnan ja tehokkaiden tuotantomenetelmien ansiosta.

Havaittavien virheiden syiden selvittäminen ei ole aina kovin yksiselitteistä. Syntyneet varioit voivat johtua monestakin eri syystä. Kuten edellä mainittiin, rakenteen iällä ja sen lisäksi rakennusajankohdan rakentamiskulttuurilla ja -menetelmillä on vaikutusta rakenteiden vauriotasoon. Suunnittelunormien muutokset vaikuttavat myös rakenneratkaisuihin, jolloin esimerkiksi 1980-luvulla rakennetut rakennukset toimivat eri tavalla kuin 2000-luvulla rakennetut. Tällä on vaikutusta rakenteiden vauriotasoon. Tutkimustulokset osoittivat, että nykyajan rakentamiskulttuuri on mennyt pitkien jännevälien ja hoikkien rakenteiden

suuntaan. Laajojen rakenteiden yhdistäminen hoikkiin rakenteisiin saattaa vaatia suunnittelussa suurta lisätarkkuutta.

Pitkien jännevälien rakenteet ovat riskialttiita suurille onnettomuuksille, jos esimerkiksi rakenteiden jatkuvaa sortumista ei ole estetty tai huomioitu.

Rakenteiden massiivisuuteen ja visuaaliseen ulkoasuun vaikuttavat rakentamiskulttuurin lisäksi muun muassa jännitys-, taipuma-, kiepahdus- ja palotekniset mitoituskriteerit.

Rakentamiskulttuurin ja –menetelmien lisäksi on myös merkitystä, mihin aikaan vuodesta rakentaminen tapahtuu. Liimapuurakenteet muuttavat tasapainokosteuttaan ympäröivän ilman mukaan, joten heti rakentamisen jälkeen voi rakenteisiin syntyä kuivumiskutistumahalkeamia. Sisätiloissa puu on kuivimmillaan yleensä talvella ja ulkotilarakenteissa kesällä. Rakenteiden käyttöönoton yhteydessä tulee huomioida, ettei rakennusten sisällä tapahtuva lämpötilan muutos ole liian voimakas ja äkillinen. Liimapuun kuivuminen epätasaisesti aiheuttaa rakenteelle halkeamia.

Yhdessäkään kohteessa ei ollut havaittavissa huolestuttavan tai vaarallisen näköistä vauriota. Silmämääräisellä arvioinnilla voitiin tarkistaa olivatko vauriot mahdollisesti vaarallisilla alueilla, mutta tarkempi tarkastelu olisi vaatinut rakennepiirroksia ja lujuuslaskelmaa. Kiikareiden avulla korkeimpien rakenteiden silmämääräinen arviointi olisi ollut tehokkaampaa. Matalalla sijaitsevien liimapuurakenteiden halkeamien syvyyden tarkastelussa olisi rakotulkki ollut avuksi.

8 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kantavien liimapuurakenteiden tyypillisimpiä vaurioita sekä niiden luonnetta, vaurioiden yleisyyttä ja korjausmenetelmiä. Tutkimuksessa päästiin hyvin tavoitteeseen tutkimusotoksen ollessa kattava ja monipuolinen rakenteiden eri tyyppien ja ikäryhmien puolesta.

Tavoitteena oli myös selvittää Suomessa tapahtuneet liimapuurakenteiden sortumiset ja onnettomuustilanteet julkisuuteen päässeistä tapauksista. Julkisuuteen päässeiden tapausten ja lehtiartikkeleiden avulla pystyttiin selvittämään mistä tyypillisimmät kantavien rakenteiden vauriot ovat johtuneet. Tyypillisiä onnettomuuksia, jotka ovat nykyään yleistyneet, olivat alakattojen romahtamiset ripustuskuormien ylitysten ja kiinnitystapojen vuoksi. Alakattojen romahtamiset rinnastetaan julkisuudessa virheellisesti kantavien rakenteiden sortumisiin. Tapausten avulla pystyttiin selvittämään, että ongelma on hyvin harvoin ollut liimapuussa. Onnettomuudet ja vaaratilanteet ovat johtuneet lähinnä suunnitteluvirheistä ja rakentamiskulttuurin muutoksesta kiireellisemmäksi. Rakennusurakat ovat muuttuneet yhä yksilöllisemmiksi ja pilkotuimmiksi, joten suurten kokonaisuuksien hallinta ei ole nykyään niin vahvaa.

Kohteiden silmämääräinen analysointi antoi kattavan kuvan liimapuurakentamisen tasosta ja tyypillisistä vaurioista. Harmittomatkin vauriot saattavat aiheuttaa huolta asiakkaiden keskuudessa vallitsevan epätietoisuuden vuoksi. Tämän tutkimuksen avulla voitiin selvittää millaiset vauriot ovat haitallisia ja milloin on syytä ryhtyä jatkotoimenpiteisiin. Tutkituista rakenteista saatiin selville, mitkä ovat hyvin tyypillisiä vaurioita liimapuurakenteille. Pääasiallisesti havaittiin, että kuivumishalkeamat ovat hyvin yleisiä etenkin vanhemmissa rakenteissa. Lisäksi ripustuskuomien ja liitostapojen vääränlainen käyttö oli aiheuttanut vaurioita kohteissa.

Tutkimuskohteet kuitenkin osoittivat että liimapuusta rakentaminen asianmukaisesti toimitettuna ja huollettuna on erittäin hyvä vaihtoehto muille rakennemateriaaleille. Liimapuurakentaminen kuten muutkin vaihtoehdot vaativat tarkkaa ammattitaitoista suunnittelua ja rakenteiden toimivuuden seuranta. Itse liimapuun valmistuksessakin on keskityttävä laaduntarkkailuun ja toimivaan tuotantotapaan. Pääasia on että lopputuloksena ovat visuaalisesti, ekologisesti sekä teknisesti toimivat rakenteet, jotka ovat ennen kaikkea käyttäjille turvalliset.

LÄHTEET

Teokset

Leivo, K., Nupponen, A. & Pitkänen, J. 1997. Eurocode 5 esimerkkilaskelmat.
Kotka: Wood Focus Oy.

Liimapuu - käsikirja. 2003. Liimapuu - käsikirja. Helsinki: Print & Media Center i
Sundsvall AB.

Puurakenteet STEP 1. 1996. Puurakenteet STEP 1. Tampere: Rakennustieto Oy.

Puurakenteet STEP 2. 1998. Puurakenteet STEP 2. Tampere: Rakennustieto Oy.

Siikanen, U. 1998. Puurakennusten suunnittelu. 4. uudistettu painos. Vammala:
Rakennustieto Oy.

Siikanen, U. 1995. Teollinen puurakentaminen. Vammala: Rakennustieto Oy.

Siikanen, U. 2001. Rakennusaineoppi. 6. uudistettu painos. Hämeenlinna:
Rakennustieto Oy.

Suomen liimapuuyhdistys Ry. 1988. Monitoimihallit. Vammala: Suomen
Liimapuuyhdistys ry ja Rakentajain Kustannus Oy

Tiehallinto. 2005. Puurakenteet: Liimapuupalkin halkeaman injektointi.
Tiehallinto.

Elektroniset aineistot

Aravuo, K. 2006. Puun sahaus, höyläys ja kyllästys [Verkkajulkaisu]. KTM:n ja TE- keskusten julkaisu [viitattu 25.2.2007]. Saatavissa: <http://www.toimialaraportit.fi>

Huhtanen, J. 2006. Puurakenteiden rakenteellinen turvallisuus [Verkkajulkaisu]. VTT [viitattu 4.3.2007]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi>

Kortesmaa, M. 2006. Liimapuun halkeilu – Ohje riskien ja korjaustarpeen arviointiin [Verkkajulkaisu]. VTT [viitattu 5.3.2007]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/>

Leino, T., Korttesmaa, M. 2006. Laajarunkoisten liikuntahallien rakenteellinen turvallisuus [Verkkajulkaisu]. VTT [viitattu 5.3.2007]. Saatavissa: http://virtual.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2006/Jul05_20-3-2006.pdf

Mölsä, S. 2003. Nollatoleranssi rakennusvirheisiin[Verkkajulkaisu]. Rakennuslehti [viitattu 1.3.2007]. Saatavissa: <http://www.rakennuslehti.fi/haku/>

Oksanen, T., Kevarinmäki, A., Yli-Koski, R. & Kaitila, O. 2005. Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen puurakenteiden liitosten palonkestävyys [Verkkajulkaisu]. VTT [viitattu 7.3.2007]. Saatavissa: <http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2005/W29.pdf>

Onnettomuustutkintakeskus. 2000. Uimahallin katon liimapuupalkin rikkoutuminen Iisalmessa 29.3.2000 [Verkkajulkaisu]. Onnettomuustutkintakeskus [viitattu 3.3.2007]. Saatavissa: <http://www.onnettomuustutkinta.fi/uploads/81f10.pdf>

- Onnettomuustutkintakeskus. 2003. Messuhallin katon romahtaminen Jyväskylässä 1.2.2003 [Verkkajulkaisu]. Onnettomuustutkintakeskus [viitattu 4.3.2007]. Saatavissa: <http://www.onnettomuustutkinta.fi/uploads/ggfjciwbanf.pdf>
- Onnettomuustutkintakeskus. 2007. Suuronnettomuuden vaaratilanteet [Verkkajulkaisu]. Onnettomuustutkintakeskus [viitattu 3.3.2007]. Saatavissa: <http://www.onnettomuustutkinta.fi/14533.htm>
- Puuinfo OY. 2007. Puuhallin suunnittelu [Verkkajulkaisu]. Puuinfo Oy [viitattu 25.2.2007]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi>
- Ranta-Maunus, A. 2003. Missä syy kattojen sortumiseen? [Verkkajulkaisu]. Helsingin sanomat [viitattu 22.11.2006]. Saatavissa: <http://www.hs.fi/arkisto>
- Taideteollinen korkeakoulu. 2007. Insinööripuutuotteet [Verkkajulkaisu]. Virtuaaliyliopisto [viitattu 25.2.2007]. Saatavissa: <http://www.uiah.fi/virtu/materiaalit/puuteknologia/5-5-insinooript.html>
- Toratti, T. 2006. Puurakenteiden vauriot ja rakentamisen laatu [Verkkajulkaisu]. VTT [viitattu 4.3.2007]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi>
- VTT. 2006a. Puurakenteiden halkeilun hallinta, opas [Verkkajulkaisu]. VTT [viitattu 5.3.2007]. Saatavissa: http://virtual.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2006/halkeilu_2006.pdf
- VTT. 2006b. Puurakenteisten hallien kuntotarkastusohjeet [Verkkajulkaisu]. VTT [viitattu 5.3.2007]. Saatavissa: http://virtual.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2006/puuhallien_kuntotarkastusohjeet_2006.pdf
- Valonen, K. 2007. Johtava tutkija. Onnettomuustutkintakeskus. Sähköpostihaastattelu. 1.2.2007

Ympäristöministeriö. 1997. B1: Rakenteiden varmuus ja kuormitukset

[Verkkajulkaisu]. Ympäristöministeriö [viitattu 18.3.2007]. Saatavissa:

<http://www.finlex.fi/data/normit/1914-b1.pdf>

LIITE 1

| Tutkintaselostus: | Onnettomuuden luonne: | Paikkakunta: | Pvm: | Onnettomuuden syy: |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| B 2/2006 Y | Kauppakeskuksen sortumisvaara | Savonlinna | 31.3.2006 | Hl- betonipalkki |
| B 2/2005 Y | Marketin sisäkaton putoaminen | Syvä | 27.4.2005 | Sisäkaton nauklakiinnitys nauklaleyristikon alapääteeseen |
| B 1/2005 Y | Kauppakeskuksen katon sortumisvaara | Kuopio | 18.3.2005 | Jätkosten ja hartan kohdalla puuttuvat raudotustankkoja sitovat haat |
| B 1/2004 Y | Huoltorakennuksen katon romauttaminen | Pohja | 1.2.2004 | Omapainon ja lumikuorman vaikutuksesta syntyi yläpääteeseen selvästi suunniteltua suurempi taivutusmomentti, suunnitteluvirhe |
| B 4/2003 Y | Kylpylän alakaton romauttaminen | Kuopio | 4.9.2003 | Ripustuslankojen katkeaminen jännityskorroosian seurauksena |
| B 3/2003 Y | Pysyväksi tarkoitettun välipohjarakenteen putoaminen huoltoasematyömaalla | Orvesi | 25.8.2003 | Hitsaustyötä ei varmistettu |
| B 2/2003 Y | Messuhallin katon romauttaminen | Jyväskylä | 1.2.2003 | Tappiwaarnallituksen huono laatu & lohkeamismurtumistarkastelun puuttuminen eurooppalaisesta puurakenteiden suunnitteluohjeesta |
| B 1/2003 Y | Monttoimihallin katon vaurioituminen | Mustasaari | 17.1.2003 | Suunnittelu- ja valmistusvirheitä: katsomon lisärakenne jäänyt analysoimatta, jäykkistäviä osia puuttui. Suunnittelua jaettu kokemattomille tekijöille. |
| B 1/2001 Y | Marketin sisäkaton putoaminen | Jyväskylä | 26.4.2001 | Vanhan sisäkaton metallisten ripustusosien pettäminen |
| B 1/2001 Y | Supermarketin sisäkaton putoaminen | Pudasjärvi | 27.12.2000 | sisäkaton nauklakiinnitys nauklaleyristikon alapääteeseen |
| B 1/2000 Y | Uimahallin katon liimapuupalkin rikkoutuminen | Iisalmi | 29.3.2000 | Liimapuupalkin pettäminen vääränlaisen palkin pään ankkuroinnin vuoksi |

| Tutkinta- selostus: | Onnettomuuden luonne: | Paiikkakunta: | Pvm: | Onnettomuuden syy: |
|------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| S1/2006 Y | Maatalouden tuotantorakennusten kattoristikoiden pettäminen | Pihitpudas | 20.3.2006 ja 2.4.2006 | Puuristikkojen vaneriliitosten pettäminen |
| | Marketin liimapuisen kattopalkin vaurioituminen | Keitele | 7.4.2006 | Liimapuun vanhalla liimatyypillä toteutetun vinoituksen pettäminen |
| | Myyymälän katon romahtaminen | Haapajärvi | 8.4.2006 | Naulalevyristikkokaton pettäminen |
| | Urheiluhallin katon teräspöimulevyjen painuminen | Jyväskylä | 8.4.2006 | Teräspöimulevyn myötäminen |
| | Ratsastusmaneesin romahtaminen | Yvelji | 9.4.2006 | Naulalevyristikkokaton pettäminen |
| | Tukkuliikkeen katon romahtaminen | Joensuu | 15.4.2006 | Teräspöimulevyn pettäminen liimapuukannattajien välistä |
| | Liikuntasalin kattopalkki | Laukaa | 3.4.2006 | Ei tarkkaa tietoa, mutta lumen aiheuttamat kuormitukset ja kuivumiskutistumisen myötä palkin alareunaan muodostunut vällys aiheuttanut yläreunaan halkeamista(puutti) |

| Onnettomuuden luonne: | Paikkakunta: | Vuosi: | Onnettomuuden syy: |
|--------------------------------------------------------|---------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Jalkapallohallin katon teräsrakenteissa vaurioita | Tali | 2003 | Samantiaisia suunnitteluvirheitä stabiiliteetissa ja liitoksissa kuin Botnianhallissakin. Sama suunnittelija. |
| Sortumawaara | Pietarsaari | 2003 | Kestopuuisissa sekundäärin-kannattimissa lahoavaurioita, lumen pääsy rakenteisiin |
| Sortumawaara uimahallissa | Kuopio | 1993 | Yläpohjan betoniset ML-palkistot olivat niin huonokuntoisia, että ne vahvistettiin limapuuapalkeilla |
| Teräsrakenteinen halli romahti | Sipoo | 1999 | Halli oli suunniteltu ja rakennettu väärin. Lumikuormat eivät ylittyneet, mutta saivat vaurion aikaan. |
| Lidlin kattovaurioita sisäänkäynnin pääjiihin kohdalla | Vammala, Huitinen, Porvoo | 2003 kesäkuu | Systemaattisia suunnitteluvirheitä. L-muotoisessa NR-ristikoista koottavassa puiseessa tyypirakenteessa stabiiliteettiongelmia ja siirtymä. |
| Osassa jännebetonipalkeista näkyviä vaurioita | Oulu | 2003 | Palkeissa isoja systeemireikiä lähellä toisiaan, katto ei olisi kestänyt taken lumikuormia. |
| Finndorno tehtaan katon limapuuapalkki halkeli | Säynätsalo | 2003 | Rakennuksella ikää 30 vuotta |
| Kattorakenteissa vaurioita lumikuormista | Oulu | 1980-luvun loppu | Puurakenteiden suunnittelussa ja liitoksissa virheitä |