



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

PITKÄKOSKI NIKLAS
PUULIITOSTEN MEKAANINEN KÄYTTÄYTYMINEN JA MITOITTA-
MISEN PERUSTEET

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Professori Sami Pajunen

TIIVISTELMÄ

Pitkäkoski Niklas: Puuliitosten mekaaninen käyttäytyminen ja mitoittamisen perusteet – Mechanical behavior and dimensioning of common wood joints

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 26 sivua

Tammikuu 2018

Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: Professori Sami Pajunen

Avainsanat: Puuliitokset, käyttäytyminen kuormitettuna, mitoittaminen, naulaliitos, pulttiliitos, naulalevyliitos, liimaliitos

Puurakentaminen on Suomessa suosittu tapa rakentaa etenkin pientaloja ja nykyisin puurakentaminen on kasvattamassa suosiotaan myös kerrostalorakentamisessa. Puurakentamisessa oleellisessa osassa ovat eri liitosmenetelmät ja niiden ominaisuudet. Tässä työssä käydään läpi neljä yleistä liitosmenetelmää, jotka esitellään teorian ja mitoitusohjeiden avulla.

Työssä tarkastellaan pultti-, naula-, naulalevy- ja liimaliitoksien käyttäytymistä kuormitettuna sekä niiden mitoittaminen esitellään tiivistetysti. Tarkasteltavat liitokset ovat valittu siten, että saadaan esimerkkejä hyvin joustavasta liitoksesta, kuten yhden pultin pulttiliitoksesta, sekä täysin jäykästä liitoksesta, kuten liimaliitoksesta.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty vuoden 2017 sekä alkuvuoden 2018 aikana Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laboratoriolle. Haluan kiittää työn ohjaajaa professori Sami Pajusta asiantuntevasta ohjauksesta ja kiinnostavasta aiheesta. Suuri kiitos myös kandidaatintyön seminaarikurssin aikana saaduista kommentteista pienryhmälle ja sen ohjaajalle yliopistonlehtori Olli Kerokoskelle.

Tampereella, 24.1.2018

Niklas Pitkäkoski

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	YLEISIMMÄT PUULIITOKSET	2
	2.1 Liitosten jaottelu.....	2
	2.2 Pulttiliitokset	3
	2.3 Naulaliitokset	3
	2.4 Naulalevyliitokset.....	5
	2.5 Liimaliitokset	5
3.	LIITOKSIEN KESTÄVYYTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	7
	3.1 Mitoituskestävyys.....	7
	3.2 Murtumistavat	10
4.	PULTTILIIITOKSET	13
	4.1 Käyttäytyminen kuormitettuna.....	13
	4.2 Mitoittaminen.....	14
5.	NAULALIIITOKSET	17
	5.1 Käyttäytyminen kuormitettuna.....	17
	5.2 Mitoittaminen.....	17
6.	NAULALEVYLIITOKSET.....	20
	6.1 Käyttäytyminen kuormitettuna.....	20
	6.2 Mitoittaminen ja kestävyuden todentaminen	21
7.	LIIMALIIITOKSET	22
	7.1 Käyttäytyminen kuormitettuna.....	22
	7.2 Kestävyuden todentaminen	22
8.	YHTEENVETO	24
	LÄHTEET.....	25

1. JOHDANTO

Puurakentaminen on viime vuosien aikana kasvattanut suosiotaan rakentamisessa ja herättänyt keskustelua niin ekologisuuden kuin turvallisuuden osalta. Puurakenteiden on pystyttävä tarjoamaan kestävä ja pitkäikäinen runko suurillekin rakenteille. Jotta puurakenteista saadaan kestäviä ja luotettavia, tarvitaan oikeanlaiset liitokset puuosille sekä puun ja muiden materiaalien välille.

Puuliitoksen tehtävä on liittää rakennneosia toisiinsa niin, että liitos estää osien irtoamisen toisistaan, joko sallien liitoksen taipumisen, eli deformatumisen, tai estäen sen. Liitoksilta vaaditaan erilaisia ominaisuuksia eri käyttökohteissa. Merkittävimmät arvioitavat ominaisuudet liitoksilla ovat lujuus, jäykkyys, joustavuus, valmistusprosessi, mitoitusmenetelmä, ulkonäkö, palonkestävyys, hinta ja vaikutus liitettävän kappaleen lujuuteen. Myös liitettävän materiaalin on täytettävä vaaditut arvot ja kestävä eri olosuhteet, jotta liitos on toimiva. [1] Puuliitokset eroavat suunnittelultaan suuresti esimerkiksi teräslitoksista, sillä puun ominaisuudet vaihtelevat eri kuormitussuunnissa. [2, s. 63] Tämä tekee puuliitosten suunnittelusta mielenkiintoista. Erilaiset puuliitokset käyttäytyvät monin eri tavoin rasituksen alaisena ja nämä erot on tiedostettava jo rakenteiden suunnittelun alkuvaiheissa. Tällöin voidaan valita järkevä ratkaisu niin rakenteellisen toiminnan, toteuttamisen ja taloudellisen näkökulman kannalta.

Puuliitoksille ominaista on joustavuus, sillä puu kestää hyvin taivutusta ja monet rakennosat suunnitellaan nivelliitoksin rakennemalleissa. Tällöin myös liitoksen on sallittava puun taipuminen suunnitellun nivelen kohdalta. [4] Jäykkiä liitoksia sen sijaan käytetään taivutusmomentille sekä pelkästään vedolle ja puristukselle altistuvissa rakenteissa, kuten jatketuissa palkeissa ja kattoristikoiden sauvoissa. Joustavuuden lisäksi puuliitoksille ominaista on liitosten symmetrisyys. Liitokset kiinnittyvät useimmiten puuosien reunoille, jolloin epäsymmetrinen liitos voi aiheuttaa taivutusta rakenteeseen. Taivutus aiheutuu epäsymmetrisen liitoksen tukivoiman epäkeskeisyydestä suhteessa kappaleiden systeemilinjaan, eli kappaleen sauvavoimaan. Epäsymmetrisyydestä johtuva taivutus voi johtaa rakenteen pettämisen, ellei epäsymmetrisyyttä ole otettu huomioon suunnittelussa. [1]

Tässä työssä selvitetään kirjallisuustutkimuksena, mitkä ovat yleisimmät puurakenteiden liitosmenetelmät ja miten ne käyttäytyvät kuormitettuna. Tarkemmin keskitytään pultti-, naula-, naulalevy- ja liimaliitoksiin. Myös liitosten mitoittamisen perusteet ja soveltuvuus eri käyttökohteisiin esitellään. Käsiteltävät liitokset ovat valittu siten, että saadaan esimerkkejä hyvin joustavasta liitoksesta, jollaista edustaa pulttiliitos, täysin jäykkään liitokseen, jollainen on liimaliitos.

2. YLEISIMMÄT PUULIITOKSET

Puuosien toisiinsa liittämiseksi on useita eri ratkaisuja ja eri ratkaisujen yhdistelmiä. Liitosmenetelmän valitsemiseen on monia vaikuttavia syitä, kuten rakenteellinen toiminta ja rakentamisen aikainen toteuttaminen.

Tässä työssä käsitellään neljä yleistä liitosmenetelmää: pultti-, naula-, naulalevy- ja liimaliitos. Nämä kattavat tapaukset hyvin joustavasta liitoksesta täysin jäykkään. Liitosmenetelmiä on työssä käytettävien lisäksi lukuisia muitakin, kuten esimerkiksi nykyisin suosittu ruuviliitos ja perinteisempää rakentamista edustava kosketusliitos, jota käytetään hirsirakenteissa. Myös eri liitostyyppien yhdistelmät ovat yleisiä.

2.1 Liitosten jaottelu

Liitokset voidaan jakaa niiden fysikaalisen toiminnan mukaan, mihin tämä työ keskittyy. Tällöin liitokset jaotellaan *mekaanisiin liitoksiin* ja *liimaliitoksiin*. Jäykin liitostapa on liima, joka ei salli liitoksen joustamista ilman lujuuden menettämistä. Mekaaniset liitokset taas välittävät voimat liitettävien materiaalien ja liittimien välisten kosketuspintojen kautta. Tällöin liitos ei menetä koko lujuuttaan liitoksen joustaessa. Pultti-, naula- sekä naulalevyliitokset ovat mekaanisia liitoksia. [2, s. 63]

Liitokset voidaan myös jakaa kolmeen perusryhmään hyväksymismenettelyn perusteella:

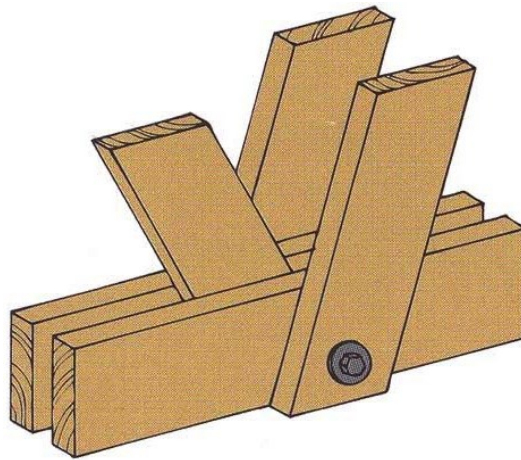
- *Normitetut liitokset* ovat liitoksia, joille on rakenne- sekä suunnitteluohjeet. Normitettuja liitoksia voi valmistaa kuka tahansa.
- *Erikois selvityksen vaativat liitokset* eivät kuulu puunormien mukaisiin liitoksiin ja vaativat siksi usein asiantuntijan lausunnon ennen käyttöä.
- *Luvanvaraiset liitokset* ovat liitoksia, joilla on suuret vaatimukset valmistustekniikalle, -oloille ja -laitteille.

Pultti- ja naulaliitokset, ovat työmaalla toteutettavissa olevia liitoksia ja kuuluvat *normitettuihin liitoksiin*. Naulalevy- ja liimaliitokset valmistetaan tehdasympäristössä, sillä niiden toteuttamiseen on säädöksiä, jotka vaativat tarkkaa laadunvalvontaa ja hyviä olosuhteita, jotka eivät olisi aina toteutettavissa työmaalla. Tämän takia ne kuuluvat *luvanvaraisiin liitoksiin*. [2, s. 63]

Perinteisimmät liitokset ovat kosketusliitoksia, kuten liitos- ja tukiloveuksia sekä tapituk-sia. Nämä liitokset perustuvat puristusvoimien, loveuksien ja naulojen yhteistyöhön. Perinteisten liitosten tehtävä on yleensä pitää liitettävät osat paikoillaan, jotta puristusvoimat pääsevät siirtymään kosketuksessa olevien pintojen kautta kappaleelta toiselle. [2, s. 64]

2.2 Pulttiliitokset

Pulttiliitokset ovat yleinen tapa liittää toisiinsa etenkin isompia kappaleita, kuten hallirakenteiden pilareita ja palkkeja. Pulttiliitokset voidaan jakaa karkeasti kahteen tyyppiin: vedettyihin, joissa pultti vastustaa voimaa pultin akselin suuntaisesti, ja leikkautuviin, joissa voima kohdistuu kohtisuoraan pultin akselille. [4] Tässä työssä keskitytään vain jälkimmäiseen, joka on puurakenteissa yleisempi. Kuvassa 1 on esitetty liitoksen esimerkkitapaus. Muut liitostyypit käsitellään vastaavassa kuormituksessa, jolloin reaktiot ovat vertailukelpoisia.



Kuva 1. Esimerkki pulttiliitoksesta [2, s. 66].

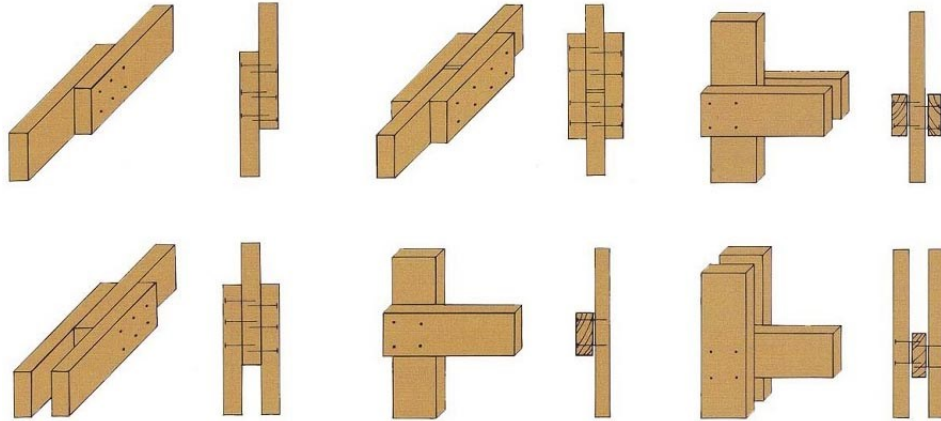
Pultin hyviä puolia ovat lujuus, joustavuus riippuen liitoksesta, selkeä mitoitus ja asennuksen helppous työmaalla. Pultteja käytetään yksinään järeissä rakenteissa, mikäli liitoksen jäykkyydelle ei ole vaatimuksia. Liitoksessa pultin tehtävä on useimmiten sitoa rakenneosat paikoilleen, jolloin voimat siirtyvät puuosien pintapuristuksen kitkan avulla eteenpäin. [1]

Huono puoli pultilla on kuormituksen aiheuttama suuri alkusiirtymä, joka lisääntyy myös puun kuivuessa. Tämä johtuu siitä, että pultin asennusreiät sallivat pienen siirtymän, ennen kuin voimat siirtyvät osien pintakitkalta myös pultille leikkausvoimaksi. Jäykkyyttä lisätäänkin usein yhdistämällä liitokseen muita liitostyyppejä, kuten nautoja tai vaarvoja, minkä johdosta puhdas pulttiliitos on nykyisin harvinainen kantavissa rakenteissa. [1]

2.3 Naulaliitokset

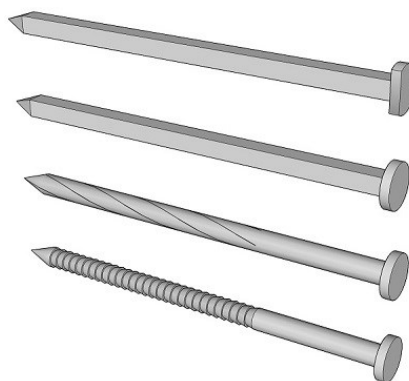
Naulat ovat yksi perinteisimmistä ja edelleen yksi suosituimmista puuliitoksista, etenkin kevyemmissä rakenteissa, kuten pientalojen puurankarungoissa. Yksittäinen naula ei pysty ottamaan suuria kuormia vastaan, minkä takia käytetään useamman naulan ryhmiä.

Naulalla on monia hyviä puolia ja siksi sitä käytetään laajasti puurakentamisessa edelleen. Naulan etuja ovat: hyvä joustavuus pienillä muodonmuutoksilla, vähäinen naulatun kappaleen heikentäminen, mitoittamisen selkeät ohjeet, asentamisen helppous, naulan huomaamattomuus ja edullisuus. [1] Kuvassa 2 on esimerkkejä tavallisista naulaliitoksista. Naulaliitoksessa naula useimmiten lävistää naulan kannan puoleisen kappaleen kokonaan ja vastakappaleen vain osittain, jolloin terävä kärki jää suojaan rakenteeseen.



Kuva 2. Esimerkkejä naulaliitoksista [2, s. 66].

Erilaisia liitoksia varten nauvoja on useita eri tyyppisiä, joissa vaihtelevat kärjen muoto, pinnan profiili, mittasuhteet sekä kannan koko ja muoto. Tavallisin naulatyyppi on *lanka-naula*. Se soveltuu parhaiten vastaanottamaan leikkausvoimia, sekä pitämään kevyille kuormille altistuvia kappaleita paikoillaan. Toistuville rasituksille soveltuu parhaiten *kierrenaula*, joka on muodoltaan kierteitetty. Kierrenaulaa vahvempi on *kampanaula*, jonka pitokyky on suurin. [2, s. 64] Kampanaulalla on hammastus, joka vastustaa ulosvetämistä. Kuvassa 3 on esitettyinä eri naulatyyppisiä.



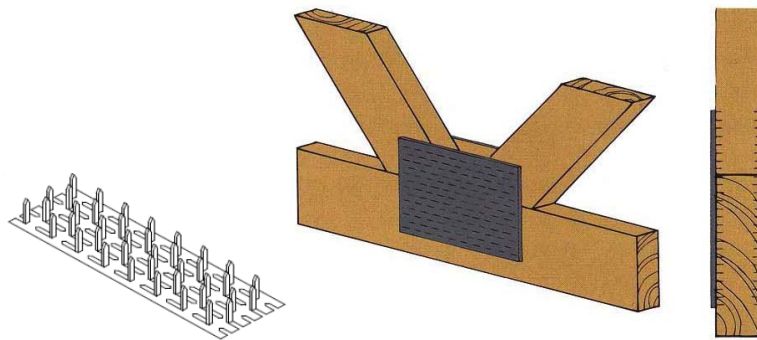
Kuva 3. Naulatyyppisiä järjestyksessä ylhäältä alaspäin paineilmanaulaimen lanka-naula, lanka-naula, kierrenaula ja kampanaula.

Naulojen korroosionkestävyyttä parannetaan galvanoinnilla tai kuumasinkityksellä, joilla naulan pintaan saadaan korroosiota kestävä sinkkipinta. [2, s. 64] Korroosiolta suojamattomia nauvoja käytetään pelkästään väliaikaisissa avustavissa rakenteissa.

Nykyisin suurin osa nauloista kiinnitetään paineilmanaulaimilla. Naulaimille on kehitetty erityiset naulatyypit, joista useimmiten huomattavin ero tavalliseen lankanaulaan on puolilympyrän muotoinen kanta. [2, s. 64]

2.4 Naulalevyliitokset

Naulalevyt ovat metallilevyjä, joihin on lävistetty ja taivutettu useita ulokkeita, jotka toimivat nauloina. Naulalevyliitoksia nähdään useimmiten kattoristikkorakenteissa. Naulalevyjä käytetään siteinä liittämään samanvahvuisia puukappaleita toisiinsa. Levyt puristetaan pareittain liitettävien puiden molemmille puolille symmetrisesti. [2] Kuvassa 4 on esitetty naulalevy ja naulalevyillä toteutettu liitos.



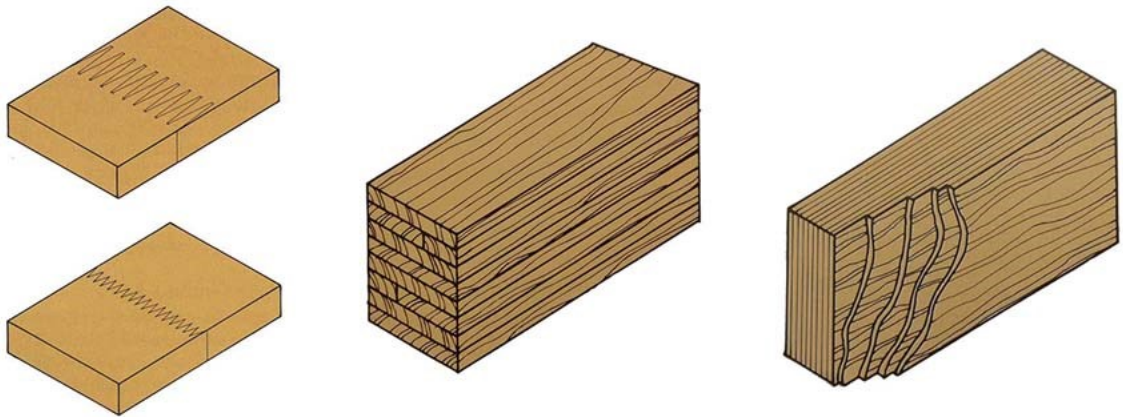
Kuva 4. Naulalevy ja naulalevyliitos [1][2, s. 67].

Naulalevyissä on hyvin vähän eroavaisuuksia, vaikkakin levyvaihtoehtoja ja kokoja on monia. Naulalevyille on myös järeämmille rakenteille tarkoitettu korvike, *piikkilevyt*. Piikkilevyissä teräslevyyn on hitsattu erillisiä piikkejä. [2, s. 67]

Naulalevyt mullistivat 1900-luvun puolivälin jälkeen puurakennekomponenttien valmistamisen. Sauvojen koot pienenevät, kun rinnakkaista sahatavaraa ja työläitä työvaiheita, kuten poraamista ja käsin naulaamista, ei enää tarvittu. [5]

2.5 Liimaliitokset

Liimaliitoksia käytetään pääasiassa puutavaran sormijatkoksissa, liimapuun saumoissa ja jatkoksissa, puulevyjen ja viilupuiden valmistuksessa sekä ohutuumakannatteiden uuman liitoksissa ja paarteissa. Kuvassa 5 on esitetty esimerkkejä liimaliitoksista. Kantavien rakenteiden liimaliitokset ovat luvanvaraisia, jonka takia niitä tehdään vain tehtaissa ja tuotanto on keskittynyt valmistuotteisiin. Tästä syystä liimaliitoksilla on harvoin arkkitehtoninen merkitys rakenteisiin tehtävien liitosten osalta. [2, s. 69]



Kuva 5. Liimaliitoksia eri käyttökohteissa. Vasemmalta oikealle: sormijatkos, liimapuuh ja viilupuu. [2]

Liitoksissa käytetään kaseiini- ja kertamuoviliimoja, joista kaseiini soveltuu pelkästään sisätilojen liimaksi. Muita liiman valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat säänkestävyys, vedenkestävyys ja lyhytaikaisen kosteuden kestävyys. [2, s. 69]

Liimaliitokset ovat täysin jäykkiä liitoksia. Kun rakenteellisissa sovelluksissa käytetään liimaliitosta, siltä vaaditaan suurempaa lujuutta ja jäykkyyttä kuin itse puulta. [6] Tällöin murtuma syntyy kuormitusalueella ehyeen puuhun, ei liimaliitokseen.

3. LIITOKSIEN KESTÄVYYTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Puu on materiaalina epähomogeenistä, ja sen lujuusominaisuudet vaihtelevat käytetyn puun ja kuormitussuunnan mukaan. Tämä tekee puuliitosten suunnittelun mielenkiintoiseksi ja samalla vaikeammaksi kuin esimerkiksi teräслиitosten suunnittelun. [2, s. 63]

Tässä työssä esitellään normitettujen pultti- sekä naulaliitoksien leikkauskestävyyden mitoittaminen käyttäen teosta RIL 205-1-2017, Puurakenteiden suunnitteluohje [3]. Suunnitteluohjeen laskut ovat varmalle puolelle yksinkertaistettuja ja käyttöalueeltaan rajoitettuja vastaavasta EN 1995-1-1 [7] suunnittelustandardista.

Naulalevyliitoksille ei ole standardoitua laskentamenetelmää, joten sen mitoittaminen esitellään nykyisin käytössä olevien mitoitustapojen kautta. Liimaliitoksien, tässä tapauksessa sormijatkoksien, mitoittamiseen ei myöskään ole yleisiä ohjeita. Jokainen liimaliitoksella valmistettu tuote on testattava, jotta voidaan todeta liimaliitoksen kestävyys. [6] Mitoittamisen sijaan standardit naulalevyille ja liimaliitoksille käsittelevät ja määrittävät menetelmiä ja ominaisuuksia, joiden kautta todetaan liitosten mekaaninen lujuus. Naulalevyjä käsittelee standardi SFS-EN 14545 [8]. Sormijatkoksen lujuus taas arvioidaan standardin SFS-EN 15497 [6] mukaan vastaavasti kuin sahatavaran, jossa ei ole sormijatkoksia. Sormijatkoksien lujuuksien on oltava vähintään yhtä suuria kuin sahatavaran, jossa ei ole sormijatkoksia.

3.1 Mitoituskestävyys

Liitoksia mitoitettaessa oleellimmat liitoksen lujuuteen vaikuttavat tekijät ovat veto-, puristus- ja leikkauslujuus, jäykkyys ja taivutusvastus. Liitoksilla on laskennallinen mitoituskestävyys, johon vaikuttavat materiaalien osavarmuusluvut sekä aikavaikutuskerroin. Kertoimet lisäävät liitokselle saatavan laskennallisen kestävyuden varmuutta. Liitoksen mitoituskestävyys R_d määritellään kaavalla

$$R_d = \frac{k_{mod} R_k}{\gamma_M}, \quad (3.1.1)$$

missä k_{mod} on taulukon 1 mukainen liitospuun aikavaikutuskerroin, R_k on liittimen kestävyuden ominaisarvo ja γ_M on liitoksen materiaaliosavarmuusluku, joka saadaan taulukosta 2 [3, s. 103].

Taulukko 1. Kuorman keston ja käyttöluokan muunnoskerroimen k_{mod} arvo [3, s. 49].
Tähdellä * merkityt materiaaleja voidaan käyttää vain käyttöluokassa 1.

Materiaali	Käyttöluokka	Kuorman aikaluokka				
		Pysyvä	Pitkäaikainen	Keskipitkä	Lyhytaikainen	Hetkellinen
Sahatavara, Pyöreä puutavara, Liimapuu, Vaneri, CLT	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,9
Lastulevy P4* ja P5, OSB/2*, Kova kuitulevy	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
Lastulevy P6* ja P7, OSB/3 ja OSB/4	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,9
Puolikovat kuitulevyt: MBH.LA*, MBH.HLS, MDF.LA* ja MDH.HLS	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
	2	-	-	-	0,45	0,8

Käyttöluokilla tarkoitetaan eri olosuhteista johtuvia rasitustiloja. Käyttöluokkaan 1 kuuluvat lämpimissä sisätiloissa olevat puurakenteet, käyttöluokkaan 2 ulkona kosteudelta suojatut rakenteet ja käyttöluokkaan 3 säälle ja kosteudelle alttiit rakenteet. [3, s. 33]

Aikaluokat määritellään kuormien vaikutusajan mukaan. Pysyvään aikaluokkaan kuuluvat rakenteen omat painot ja kiinteästi vaikuttavat kuormat, kun taas pitkäaikaiseen esimerkiksi varastoidut tavarat. Keskipitkään aikaluokkaan kuuluvat lumi- ja hyötykuormat. Lyhytaikaisia ovat pistehyötykuormat sekä väliseinien ja kaiteiden vaakakuormat. Hetkelliseen aikaluokkaan kuuluvat tuuli ja onnettomuuskuormat. [3, s. 32–33]

Taulukko 2. Liitoksen materiaaliosavarmuusluvun γ_M arvoja eri materiaaleille [3, s. 47].

Perusyhdistelmät:	
Sahatavara ja pyöreä puutavara	1,3
Liimapuu, CLT	1,25
LVL, vaneri, OSB-lastulevy	1,2
Muu lastulevy, kuitulevyt	1,3
Liitokset	1,3
Naulalevyliitokset:	
- tartuntalujuus	1,25
- levyn lujuus (teräs)	1,1
Onnettomuusyhdistelmät	1,0

Kun yhdessä liitoksessa käytetään useampaa liitintä tai liitostyyppiä, yhdistelmän kestävyys on yleensä pienempi kuin yksittäisten liitosten summa. Useammat liitokset voivat esimerkiksi heikentää kiinnitettävää kappaletta enemmän kuin yhtä liitosta käytettäessä. Suurin eroavuus liitoksien yhdistelyssä on liiman ja mekaanisen liitoksen yhdistelmä. [3, s. 103] Tässä tapauksessa liittimien ei lasketa toimivan yhdessä, sillä mekaaniselle liittimelle saattavat kuormat siirtyä vasta, kun liimaus on pettänyt. Tämä johtuu siitä, että

liima ei salli alkusiirtymää, joka mekaanisessa liitoksessa syntyy ennen täyttä kuormaa. Näissä tapauksissa mekaaninen liitin voi olla varmistamassa, jos liimaus pettää.

Puikkoliittimien, eli esimerkiksi ruuvien, naulojen ja pulttien tapauksessa useampien samanlaisten liitosten ollessa puun syysuunnassa saadaan liitinrivin kestävyuden tehollinen ominaisarvo $F_{ef,d}$ kaavasta

$$F_{ef,d} = n_{ef} R_d, \quad (3.1.2)$$

missä n_{ef} on syysuuntaisten peräkkäisten liittimien tehollinen määrä ja R_d on yksittäisen liittimen kestävyuden ominaisarvo. [3, s. 104] Liittimien tehollinen määrä saadaan kaavasta

$$n_{ef} = \min \left\{ n_i, n_i^{0.9} * \sqrt[4]{\frac{a*t}{50*d^2}} \right\}, \quad (3.1.3)$$

missä n_i on puun syiden suuntaiseen riviin sijoitettujen puikkoliittimien lukumäärä ja a liittimen tai liittimien sijainnista riippuva etäisyys. Kaavassa muuttuja t ottaa huomioon liitokseen kiinnitettävien kappaleiden paksuudet ja d on liittimen paksuus. [3, s. 123] Liittimen tai liittimien sijainnista riippuva etäisyys a saadaan kaavasta

$$a = \min \left\{ \begin{array}{l} \min(a_1, a_3), \text{ kun } n_i \geq 2 \\ a_3, \text{ kun } n_i = 1 \end{array} \right\}, \quad (3.1.4)$$

missä a_1 on peräkkäisten liitinten etäisyys puun syiden suunnassa ja a_3 päätyetäisyys. Liitokseen kiinnitettävien kappaleiden vahvuuden vaikutus t saadaan kaavasta

$$t = \min \left\{ \begin{array}{l} \min(t_1, t_2), \text{ (a)} \\ \min(2t_1, 2t_2, t_s), \text{ (b)} \end{array} \right\}, \quad (3.1.5)$$

missä t_1 ja t_2 ovat puutavaran paksuudet liitoksen reunaosissa ja t_s puutavaran paksuus liitoksen ohuimmassa keskiosassa. Kaavan (3.1.5) a-kohtaa käytetään, kun liitoksessa on puutavaraa vain reunaosissa, ja b-kohtaa, kun kyseessä on muut 2- tai monileikkeisemmät liitokset.

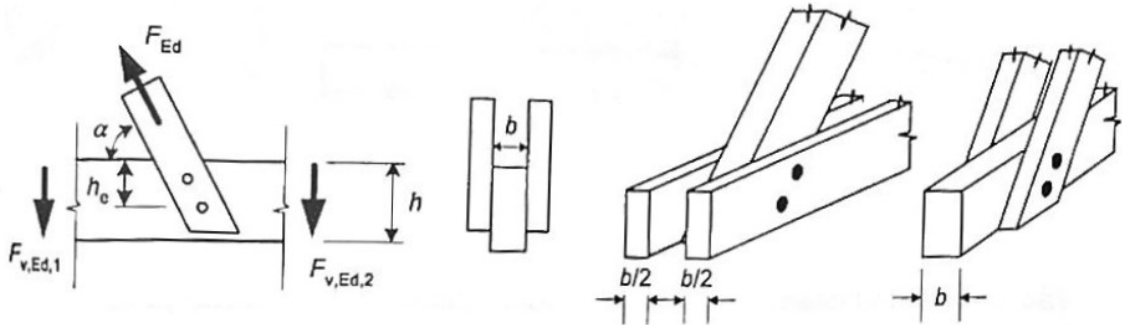
Puun halkeamiskestävyuden riittävyys on tarkistettava, kun liitosvoima vaikuttaa vinossa kulmassa puun syysuuntaan nähden. On siis tarkistettava, että seuraava ehto toteutuu:

$$F_{v,Ed} \leq F_{90,d}, \quad (3.1.6)$$

missä $F_{v,Ed}$ on puun syitä vastaan kohtisuorien voimien aiheuttamat leikkausvoimat ja $F_{90,d}$ on halkeamiskestävyuden mitoitusarvo. [3, s. 104] Halkeamiskestävyuden ominaisarvo saadaan kaavasta

$$F_{90,k} = 14 * b * \sqrt{\frac{h_e}{(1-\frac{h_e}{h})}} \quad [\text{N}], \quad (3.1.7)$$

missä b on puuosan paksuus tai pintaliittimiä käytettäessä enintään liittimen tunkaumasyyvyys [mm], h_e on etäisyys kuorman puoleista reunasta kauimpaaseen liitimeen ja h on sauvan korkeus. Kuvassa 6 on esitetty edellä mainitut mitat. Kaavaa (3.1.7) ei käytetä viilupuiden eikä ristiin liimatun puun, kuten CLT:n (Cross Laminated Timber) lapeliitoksissa, sillä näissä syyt eivät ole samaan suuntaan poikkileikkauksessa.



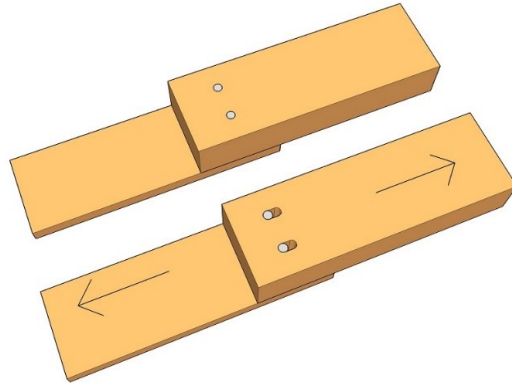
Kuva 6. Halkeamiskestävyyden mitoitusarvon mitat [3 s. 105].

Mikäli liitos suunnitellaan epäsymmetrisenä, eikä liitoksen aiheuttamia taivutusjännityksiä huomioida, otetaan sauvavoimat 1,5-kertaisina [3, s. 105]. Tämän takia pyritään aina symmetrisiin liitoksiin.

Liitokselle voi myös kohdistua vuorotellen vetoa ja puristusta. Jos liitosvoima vaihtelee vedon $F_{t,d}$ ja puristuksen $F_{c,d}$ välillä keskipitkällä tai pitkällä aikavälillä, mitoitetään liitos sekä vetovoimalle $F_{t,d} + 0,5F_{c,d}$ että puristusvoimalle $F_{c,d} + 0,5F_{t,d}$. [3, s. 105]

3.2 Murtumistavat

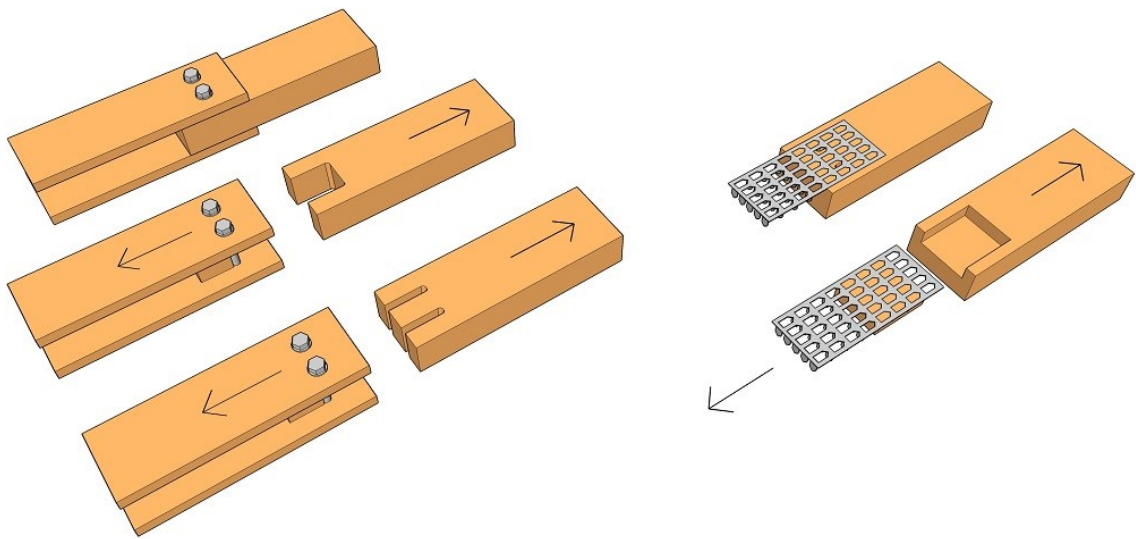
Liitoksien kestävyys vaikuttaa oleellisesti puun kestävyys, etenkin sen lohkeaminen ja halkeaminen. Tavoiteltavin puun murtumisen muoto on puristumismurtuminen, jolloin puu puristuu kasaan pultin tai muun kiinnikkeen rasittamana. Tällöin äkillistä murtumaa ei synny ja voidaan havaita rakenteen yllirasitus ennen sortumista. [4] Puristumismurtuminen on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Puristumismurtuminen.

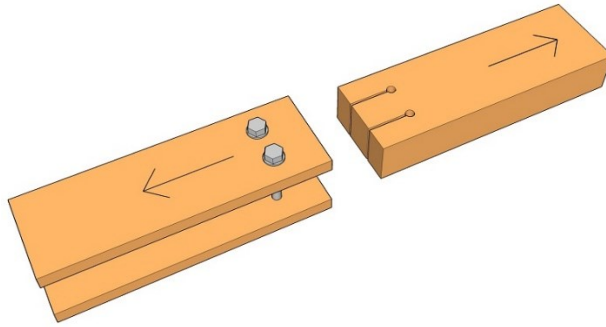
Suurin osa liitoksien murtumisista ovat kuitenkin äkillisiä ja johtuvat puun lohkeamisesta tai halkeamisesta. Lohkeamismurtoa on kahta tyyppiä: läpilohkeaminen ja palalohkeaminen. Läpilohkeamista syntyy puikkoliitoksissa, joissa puikko lävistää koko puukappaleen, kuten pulttiliitoksissa. Palalohkeamista syntyy, kun pintaliitin ei lävistä koko kappaletta, kuten naulalevyliitoksissa. [3, s. 107]

Lohkeamisessa rasituksen alla oleva puukappale leikkautuu irti. Kuvassa 8 on esitetty lohkeamismurtumistavat. Läpilohkeaminen ja palalohkeaminen käydään tarkemmin läpi pultti- ja naulalevyliitosten mitoituksessa.



Kuva 8. Kuvassa vasemmalla läpilohkeamisen esimerkkitapauksia pulttiliitoksessa ja oikealla palalohkeaminen naulalevyliitoksessa.

Halkeamismurtumassa puukappale aukeaa liittimen kohdalta puun syiden suuntaisesti ja mahdollistaa puikkoliitoksen murtumisen. Halkeamisen jälkeen puukappale voi palautua alkuperäiseen muotoonsa. Kuvassa 9 on esitetty halkeamismurtuman esimerkki.



Kuva 9. Halkeamismurtuminen pulttiliitoksessa.

Liitoksessa käytettävä liitin voi myös murtua ennen puuta, esimerkiksi pultti voi katketa leikkausvoiman vaikutuksesta. Toisessa tapauksessa liitin voi myötää rasituksen alla ja irrota kappaleesta vetäytymällä ulos asennusreiän suuntaisesti. Näin voi tapahtua esimerkiksi nauloilla ja naulalevyillä. Liitoksen ollessa todella luja, voi myös puun vetolujuus olla rajoittava tekijä ja koko kappale katkeaa heikoimmasta kohdastaan.

4. PULTTILIITOKSET

Pulttiliitoksia käytetään suurien kappaleiden välillä ja esimerkiksi puuosien perustuksiin liittämiseen. Pulttiliitoksessa pultin tehtävä on pitää kappaleet yhdessä, pintapuristuksen siirtäessä voimat kappaleelta toiselle. [1] Pultin löyhtyessä ja pintakitkan vaikutuksen loppuessa kaikki voima siirtyy pultille leikkausvoimana. Löyhtymisen voi aiheuttaa puun kuivumiskutistuminen tai pultin kiertyminen.

Tässä työssä käydään läpi leikkautuvan, eli pultin akselia kohtisuoraan kuormittavan, pulttiliitoksen mitoitus ja liitoksen käyttäytyminen kuormitettuna. Mitoittaminen on yksinkertaista normitettujen mitoitusohjeiden mukaan.

4.1 Käyttäytyminen kuormitettuna

Pulttiliitos voidaan toteuttaa täysin joustavana tai hyvin taivutusta vastustavana. Joustavuudella tässä tarkoitetaan sitä, että liitos sallii kappaleiden kiertymisen toistensa suhteen kuormitukselle kohtisuoran akselin suuntaisesti. Täysin joustava liitos syntyy yhden pultin pulttiliitoksessa, jolloin kappaleiden välisen kitkavoiman ylittyttyä, kappaleet pääsevät kiertymään pultin akselin ympäri. Mikäli pultin synnyttämä puristus kappaleiden välillä heikentyy, voi liitoksesta tulla kiertymävapaa nivel.

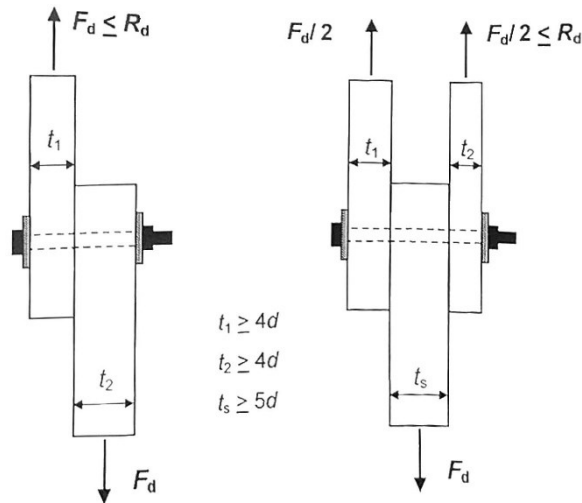
Taivutusta vastustava pulttiliitos voidaan toteuttaa käyttämällä useaa pulttia. Tällöin liitoksen pyrkiessä taipumaan ja kappaleiden välisen kitkavoiman ylittyessä pultit toimivat vääntöä vastustavina vipuina. Suurempia rakenteita mitoittaessa, on tärkeää tietää, kuinka liitos käyttäytyy momentilla kuormitettuna. Liitos voidaan analysoida elementtimenetelmään perustuvalla simulaatiolla, mutta myös yksinkertaisempia laskumenetelmiä on kehitetty [9]. Elementtimenetelmän mallissa pultit esitetään taivutusta vastustavina jousina, mitä sovelletaan muidenkin puikkoliitosten tapauksissa, kuten naulaliitoksissa.

Puhtaassa veto- tai puristuskuormituksessa rakenteen toiminnasta riippuen pulttiliitoksen jäykkyydelle ei välttämättä aseteta vaatimuksia. [1] Tällöin liitoksen käyttäytymisen kannalta puhtaan pulttiliitoksen ominaisuutena on suuri alkusiirtymä, joka koskee myös useamman pultin liitoksia. Alkusiirtymästä johtuen rakenteessa on huomioitava, että liitos sallii pienen siirtymän kappaleille toistensa suhteen pultin akselia kohtisuorassa suunnassa.

Pulttiliitoksen alkusiirtymää ja jäykkyyttä voidaan parantaa huomattavasti kiristämällä pultit suureen jännitykseen, jolloin puukappaleet siirtävät kosketuspintojen kitkan kautta enemmän kuormia. Taivutuksen vastustamiseen ja liitoksen leikkauslujuuteen ei pulttien jännityksellä kuitenkaan ole suurta vaikutusta. [10]

4.2 Mitoittaminen

Tässä työssä esiteltävä yksinkertaistettu laskumenetelmä sopii pultin akselia kohtisuoraan vetokuormitetuille pulttiliitoksille, joissa pultin paksuus $d \leq 24 \text{ mm}$ ja vetomurtolujuus $f_{u,k} \leq 800 \text{ N/mm}^2$, eli pulteille yleinen lujuusluokka 8.8. Puutavaran reunaliitososien paksuuksien t_1 ja t_2 on oltava vähintään $4d$ ja liitosten puutavarallisten sisäosien paksuus t_s on vähintään $5d$. Mitat on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Pulttiliitettävien kappaleiden mitat [3, s. 121].

Puuosien välisen pulttiliitoksen yksittäisen pultin leikkauskestävyyden ominaisarvo R_k yhdelle leikkeelle saadaan kaavasta

$$R_k = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,4 * f_h * t_u * d * \sqrt{1 + \frac{3 * M_y}{f_h * d * t_u^2}}, \\ 2 * \sqrt{M_y * f_h * d} \end{array} \right. \quad (4.2.1)$$

missä f_h ja t_u ovat liitoksen reunojen puristuslujuudet huomioivat kertoimet, d on pultin halkaisija ja M_y pultin myötömomentti. [3, s. 122] Reunapuristuslujuuden ominaisarvon kerroin f_h saadaan kaavasta

$$f_h = \min(f_{h,1,k}; f_{h,2,k}; f_{h,s,k}), \quad (4.2.2)$$

Missä $f_{h,1,k}$ ja $f_{h,2,k}$ ovat liitoksen reunapuristuslujuuksien ominaisarvoja ja $f_{h,s,k}$ on kaksileikkeisen liitoksen keskiosan ominaisreunapuristuslujuuden arvo. Reunojen puristuslujuuden toinen kerroin t_u saadaan kaavasta

$$t_u = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{t_1 * f_{h,1,k}}{f_h} \\ \frac{t_2 * f_{h,2,k}}{f_h} \end{array} \right. \quad (4.2.3)$$

missä t_1 ja t_2 ovat kuvassa 9. esitetyt puukappaleiden paksuudet. Muut kaavan muuttujat on esitetty edellä. Pultin myötömomentti M_y saadaan kaavasta

$$M_y = 0,3 * f_{u,k} * d^{2,6} [Nmm] , \quad (4.2.4)$$

missä $f_{u,k}$ on pultin vetomurtolujuuden ominaisarvo ja d on pultin halkaisija. Reunapuristuslujuudet kulman α mukaan syysuunnasta saadaan laskettua kaavalla

$$f_{h,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} * \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} , \quad (4.2.5)$$

missä $f_{h,0,k}$ on ominaispuristuslujuus ja k_{90} materiaalista riippuva kerroin puristuslujuudelle. Ominaispuristuslujuus $f_{h,0,k}$ saadaan kaavasta

$$f_{h,0,k} = 0,082 * (1 - 0,01d) * \rho_k , \quad (4.2.6)$$

missä ρ_k on käytettävän puun ominaistiheys. Kertoimen k_{90} arvot ovat havupuulle

$$k_{90,havupuuu} = 1,35 + 0,015d \quad (4.2.7)$$

ja lehtipuulle

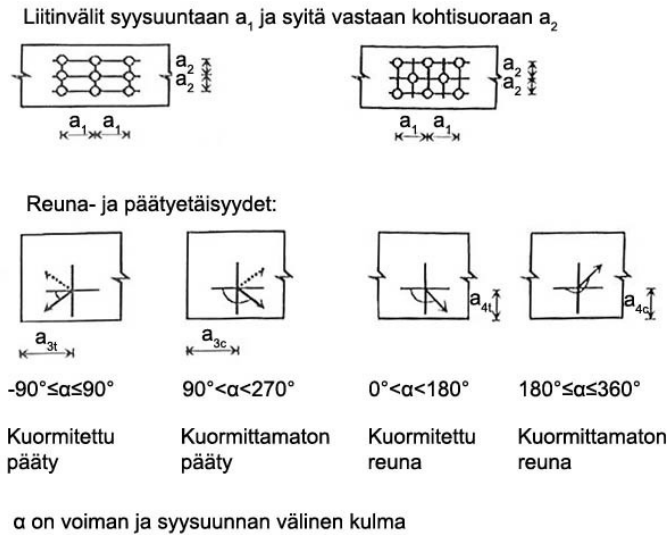
$$k_{90,lehtipuuu} = 0,90 + 0,015d. \quad (4.2.8)$$

Pulttiliitoksen pulttien sijoittelulla on myös merkitystä liitoksen kestävyuteen. Pulttien minimivälit saadaan taulukosta 3.

Taulukko 3. Pulttien minimivälit ja reuntaetäisyydet [3, s. 123].

		Puutavara yleensä
a_1	Syysuuntaan	$(4 + \cos \alpha)d$
a_2	Syitä vastaan kohtisuoraan	$4d$
a_{3t}	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$\max(7d ; 80 \text{ mm})$
a_{3c}	$90^\circ < \alpha < 150^\circ$	$(1 + 6 \sin \alpha)d$
	$150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$	$4d$
	$210^\circ < \alpha < 270^\circ$	$(1 + 6 \sin \alpha)d$
a_{4t}	$0^\circ < \alpha < 180^\circ$	$\max((2 + 2 \sin \alpha)d ; 3d)$
a_{4c}	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$3d$

Taulukossa 3 a_1 ja a_2 ovat liitinten välejä toisiinsa, a_{3t} ja a_{3c} liittimen ja päädyn väli kuorman ollessa puukappaleen päädyn läheisyydessä ja a_{4t} ja a_{4c} liittimen ja kappaleen reunan väli kuorman ollessa reunan läheisyydessä. Taulukon 3 kulmat ja välimitat on esitetty alla kuvassa 11.



Kuva 11. Pulttiliitosten liitinvälien määrittäminen [3, s. 123].

Useamman syysuunnassa olevan pultin liitoksen tehollisen ominaisarvon $F_{ef,d}$ laskeminen esitettiin kaavassa (3.1.2). Liitoksen syysuuntaisten rivien yhteenlaskettu tulos antaa koko liitoksen ominaisarvon.

Liitospuun läpilohkeamiskestävyuden ominaisarvo $F_{bt,k}$ saadaan kaavasta

$$F_{bt,k} = L_{net,t} * t_1 * k_{bt} * f_{t,0,k}, \quad (4.2.9)$$

missä $L_{net,t}$ on liitinrivien määrän ja etäisyyden toisistaan huomioiva kerroin, t_1 on sileän pultin tai tappivaarnan karaosuuden tunkeuma puusauvassa, k_{bt} materiaalin lohkeamisen huomioiva kerroin ja $f_{t,0,k}$ on puun vetolujuus ilman kokovaikutuskorjausta. [3, s. 108] Kerroin $L_{net,t}$ saadaan kaavasta

$$L_{net,t} = (n_2 - 1) * (a_2 - D), \quad (4.2.10)$$

Missä n_2 on liitinrivien lukumäärä puun syitä vastaan kohtisuorassa, a_2 on liitinrivien välinen etäisyys puun syitä vastaan kohtisuorassa ja D on liittimellä poratun reiän halkaisija. Materiaalikertoimen k_{bt} arvoksi valitaan 1,5 sahatavaraa ja CLT:tä käytettäessä tai 1,25 viilupuuta käytettäessä. Ristiviilutetulle puulle on olemassa vaihtoehtoinen pidempi kaava, jolla voidaan saada suurempi määräävä arvo. Ristiviilutetun puun syysuunnat eivät ole samaan suuntaan, jolloin erisuuntaiset viilut sitovat toisiaan ja estävät lohkeamista.

Tässä esitetyt pulttiliitoksen laskemisen kaavat ovat hyvin tiivistettyjä. Tästä johtuen suuri osa kaavoista sisältää erilaisia kertomia, jotka eivät suoraan avaa sitä, miten puun ominaisuudet vaikuttavat liitoksen kestävyyteen kunkin kaavan osalta. Itse laskeminen on kuitenkin tämän ansiosta perustapauksissa suoraviivaista.

5. NAULALIITOKSET

Naulaliitokset ovat suosittuja kevyemmissä puurakenteissa asentamisen helppouden takia. Naulojen käyttöä lisää myös naulaliitosten käyttäytymisen sopivuus puuliitoksiin ja mitoittamisen selkeys. [1]

Nauloja on eri käyttötarkoituksiin useita. Yleisimmät tyypit on esitetty edellä kappaleessa 2.3. Tässä työssä keskitytään yleisimmällä naulatypillä, *lankanaulalla*, toteutettuihin liitoksiin.

5.1 Käyttäytyminen kuormitettuna

Naulaliitos toteutetaan aina useamman naulan ryhminä, sillä yksittäinen naula ei pysty ottamaan suuria kuormia vastaan. Naulaliitoksessa käytetyistä useista nauloista johtuen naulaliitoksilla on aina myös jäykkyyttä taivutusta vastaan. Vaikka naulaliitos vastustaa taivutusta, sallii se joustamisen pienillä muodonmuutoksilla. [1] Tämä mahdollistaa naulaliitosten käyttämisen liitoksissa, joissa voi esiintyä pientä taivutusta rasituksen alla, kuten esimerkiksi puupalkkien päiden liitoksissa. Naulaliitoksessa suurimmat rasitukset kohdistuvat naulan leikkautumaan pyrkivälle osalle sekä puukappaleiden kosketuspintojen läheisyydessä olevalle puumateriaalille, joka puristuu kasaan naulan salliessa pienen taipuman [11].

Naulan asennustavasta, puuhun tiukasti lyömisestä, johtuen sillä ei ole huomattavaa alkusiirtymää. Pienen alkusiirtymän ansiosta rakenteiden muodonmuutokset oikein mitoitetuilla liitoksilla ovat pieniä. Vastaavasti kuin pulttiliitoksilla, naulaliitoksien jäykkyyttä voidaan tutkia elementtimenetelmään perustuvien mallien avulla. Yleisin tapa on käyttää mallissa naulojen tilalla jousia. [11] Jousella voidaan kuvata yksittäisen naulan toimintaa pienillä muodonmuutoksilla hyvän joustamiskyvyn takia. Suuret taipumat taas eivät sovellu naulaliitoksille, sillä nailat voivat katketa tai vetäytyä ulos kappaleista, jos nauloille kohdistuu liian suuret voimat.

5.2 Mitoittaminen

Tässä käytävä yksinkertaistettu laskentamenetelmä toimii nauloille, joiden nimellispaksuus d on 1,9-8,0 mm ja kannan pinta-ala $A_n \geq 2,5d^2$. Naulan nimellispaksuus d on standardin EN 14592 mukaisesti valmistajan määrittämä ja ilmoittama. Naulan tunkeuman on oltava kussakin puutavarassa $8d$. Kannan puoleisen puun minipaksuus on kuitenkin $7d$, sekä esiporatuissa liitoksissa ja Kerto-Q:ta käytettäessä tunkeumasyvyydet voidaan pienentää arvoon $4d$. [3, s. 109]

Naulan ominaisleikkauskestävyys leikettä kohden saadaan yleisemmille esiporaamattomille nauiloille kaavasta

$$R_k = 120d^{1,7} [N] \quad (5.2.1)$$

Ja esiporatuille kaavasta

$$R_k = 130d^{1,8} [N], \quad (5.2.2)$$

missä d on naulan nimellispaksuus. [3, s. 111] Mitoitusarvot nauiloille saadaan kaavasta

$$R_d = \frac{k_{mod}R_k}{\gamma_M} * k_\rho * (k_t \text{ tai } k_e), \quad (5.2.3)$$

missä k_{mod} on taulukon 1 mukainen liitospuun aikavaikutuskerroin, R_k on liittimen leikkauskestävyyden ominaisarvo ja γ_M on liitoksen materiaaliosavarmuusluku, joka saadaan taulukosta 2 [3, s. 112]. Kaavassa k_ρ ja k_t ovat kertoimia, joilla mitoitusarvoa voidaan joissain tilanteissa korottaa. Kerrointa k_ρ käytetään, jos puutavaran ominaistiheys ρ_k on suurempi kuin 350 kg/m^3 . Kertoimen k_ρ arvo saadaan kaavasta

$$k_\rho = \sqrt{\frac{\rho_k}{350}}, \quad (5.2.4)$$

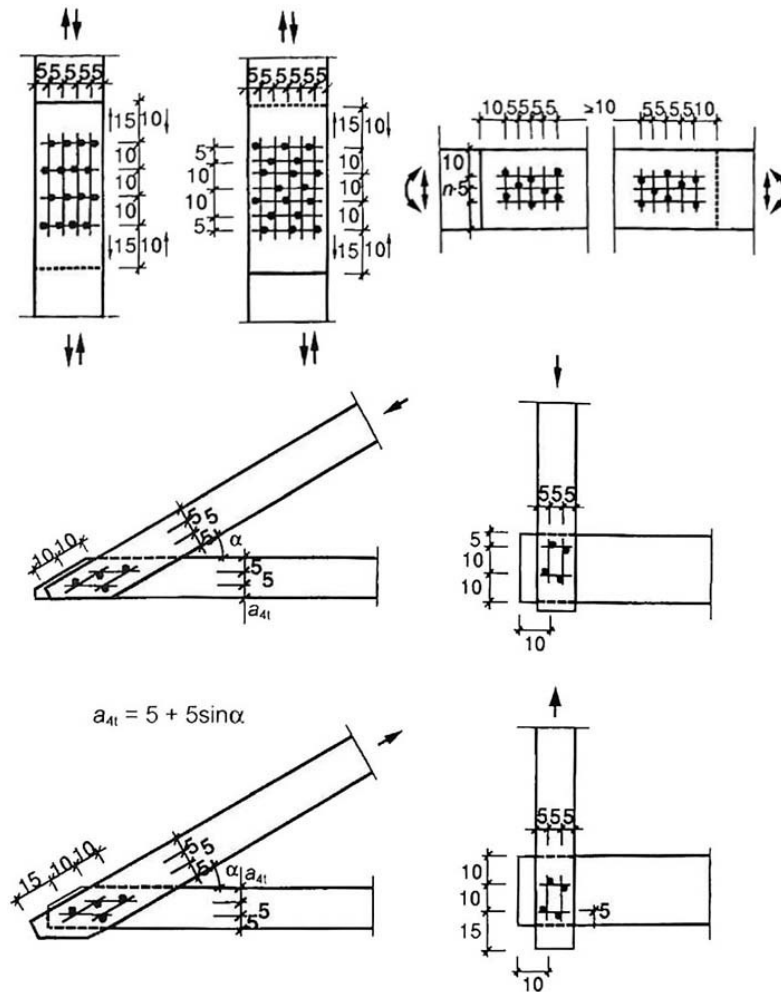
missä ominaistiheytenä käytetään heikomman materiaalin arvoa, jos liitoksessa on useampaa materiaalia. Kerrointa k_t käytetään, jos naulan tunkeumat ovat $t_1 \geq 8d$ ja $t_2 \geq 12d$. Kertoimen k_t arvo saadaan kaavasta

$$k_t = \max \left\{ \begin{array}{l} 1 + 0,3 * \frac{t_1 - 8d}{8d} \\ 1 + 0,3 * \frac{t_2 - 12d}{6d} \end{array} \right. \quad (5.2.5)$$

Korottamisen sijaan kertoimella k_e pienennetään mitoitusarvoa, jos tunkeumat ovat $t_1 < 8d$ tai $t_2 < 12d$. Pienennyskerroimen arvo saadaan kaavasta

$$k_e = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{t_1}{8d} \\ \frac{t_2}{12d} \end{array} \right. \quad (5.2.6)$$

Naulojen pienimmät sallitut etäisyydet toisiinsa ja puukappaleen reunoihin ovat esitettyinä kuvassa 12. Kuvan yksikkönä on naulan halkaisija d .



Kuva 12. Naulaliitosten liitinväljen määrittäminen [3, s. 113].

Useampien syysuunnassa peräkkäisten naulojen yhteenlaskettu leikkauskestävyys saadaan kaavasta (3.1.3), joka on esitelty kappaleessa 3.1. Peräkkäisten naulojen rivien yhteenlaskettu tulos antaa ominaisleikkauskestävyyden koko liitokselle.

Vastaavasti kuin pulttiliitoksille, on tässä esitetty naulan mitoittamisen laskukaavakkeet tiivistettyjä, eivätkä ne suoraan kerro, mistä leikkauskestävyys syntyy. Mitoittaminen on kuitenkin pulttiliitostakin suoraviivaisempaa. Lisäksi edullisuuden ja asentamisen helpouden myötä naulaliitokset ovat edelleen suosittuja.

6. NAULALEVYLIITOKSET

Naulalevyt ovat yleinen tapa jatkaa ja liittää puukappaleita toisiinsa, etenkin kattoristikkoissa. Naulalevyissä on lävistettyjä piikkejä, jotka puristetaan tehdasoloissa pareittain symmetrisesti puukappaleihin. [2, s. 67] Puun pinnalle jäänyt levyn osa sitoo naulat toisiinsa.

Naulalevyjen mitoittaminen suoritetaan valmistajakohtaisten suunnitteluohjeiden tai -ohjelmistojen avulla, sillä standardoitua mitoitusmenetelmää ei ole. Mitoitusmenetelmän puuttumisesta johtuen naulalevyvalmistajat todentavat kehittämänsä tuotteen kestävyyslaadunvalvontaa suorittavalla laitoksella. [3, s. 135]

6.1 Käyttäytyminen kuormitettuna

Naulalevyillä toteutetut liitokset toimivat rakenteessa puristusrasituksen alla vastakkain olevien puukappaleiden paikallaan pitävinä sidoksina ja siirtävät osan puristuskuormasta naulalevyn kautta puukappaleelta toiselle. Vetokuormituksessa naulalevy ottaa vastaan koko vetorasituksen. Naulalevy siirtää kuormitukset puukappaleen pinnalle jäävän metallilevyn kautta puukappaleelta toiselle, naulamuotoisten ulokkeiden toimien tartuntana ulosjäävän levyn ja puukappaleiden välillä. Naulalevyille suurimmat rasitukset jakautuvat keskelle liitosta ja levyn päädyille. [5]

Naulalevyliitoksen lujuus riippuu levyn leikkaus- ja normaalivoimien kestävydestä sekä naulalevyn tartunnasta puuhun. Liitoksen lujuuteen vaikuttaa suuresti myös rasituksen, syiden ja levyn väliset kulmat. Etenkin kohtisuoran vetoliitoksen tapauksessa naulalevyn kapasiteetti on selvästi muita mekaanisia liittimiä suurempi. [12, TIIVISTELMÄ]

Naulalevyt sallivat murtumatta liitoksille hyvin pienen joustamisen, joka on käytetystä levystä ja levyn materiaalista riippuen muutamia millin kymmenyksiä [5]. Pieni joustaminen mahdollistaa jäykkien ja mittatarkkojen ristikkorakenteiden kokoamisen. Naulalevyille ilmoitetaan myös laskennallinen kiertymävastus, jonka avulla voidaan tarkentaa suunnittelua huomioimalla sallitut taipumat levyn kiinnittämille puukappaleille. Naulalevy kykenee myös siirtämään momenttia kappaleelta toiselle. Momentti siirtyy kappaleelta toiselle puukappaleen reunan puristusvoiman ja naulalevyille syntyvän vetovoiman kautta. [13, s. 44]

6.2 Mitoittaminen ja kestävyiden todentaminen

Naulalevyjä ei mitoiteta ja teetetä tarvittua kohdetta varten, vaan valitaan hyväksyty standardoitu naulalevy, jonka ilmoitettujen ominaisuuksien mukaan koko valitaan suunnitteluohjelmistolla sellaiseksi, että vaadittu liitoksen lujuus saadaan riittäväksi. Standardi SFS-EN 14545 [8] määrittää naulalevyn vaatimukset.

Naulalevyliitoksellisten ristikoiden liitokset ovat naulalevyvalmistajien ilmoittamien kestävyysarvojenkin jälkeen monimutkaisia mitoittaa. Mitoittamisen tekee monimutkaiseksi puukappaleiden eri suuntaiset kuormien siirtymiset osittain kosketuksena ja osittain naulalevyjen kautta. Lisäksi mitoitamiseen vaikuttaa puukappaleiden liitossaumojen kohdille syntyvät leikkausrasitukset sekä naulalevyn eri lujuusarvot riippuen kuormista ja syiden suunnasta. [13, s. 31–56]

Naulalevyn yleisimmät murtumistavat ovat tartuntamurto ja levymurto [12, s. 63]. Myös palalohkeamismurto on mahdollinen ja se on mitoitettavissa standardoidusti. RIL 205-1-2017 mukaisesti naulalevyllä liitettävän puun palalohkeamiskestävyiden ominaisarvo $F_{ps,k}$ saadaan kaavasta

$$F_{ps,k} = L_{net,t} * (t_{ef} * f_{t,0,k} + (a_3 + (n_1 - 1) * a_1) * f_{v,0,k}), \quad (6.2.1)$$

missä $L_{net,t}$, t_1 , $f_{t,0,k}$, a_3 , n_1 ja a_1 on esitelty kaavojen (4.2.9) ja (4.2.10) yhteydessä. Kerroin t_{ef} huomioi liittimen leikkauskestävyyden ja reunapuristuslujuuden. Kaavassa $f_{v,0,k}$ on sahatavaralla ja liimapuulla leikkauslujuuden arvo $f_{v,k}$.

Leikkauskestävyyden ja reunapuristuslujuuden huomioiva t_{ef} saadaan kaavasta

$$t_{ef} = \frac{R_k}{d * f_{h,0,k}}, \quad (6.2.2)$$

missä R_k on liittimen leikkauskestävyys tarkasteltavassa leikkeessä, d on liittimen paksuus ja $f_{h,0,k}$ on kaavan (4.2.6) mukainen puun ominaispuristuslujuus. [3, s. 108]

Monista naulalevyliitoksen lujuuteen vaikuttavista tekijöistä johtuen mitoituslausekkeet ovat pitkiä ja tämän takia ristikoiden mitoitaminen suoritetaan hyväksytyillä ohjelmistoilla. Inspecta Sertifiointi OY hyväksyy ohjelmistot ja suunnittelijat. Mitoitusohjeina käytetään Naulalevyrakenteiden suunnitteluohjetta, joka on Inspecta Sertifiointi OY:n toimittama. [13, s. 3]

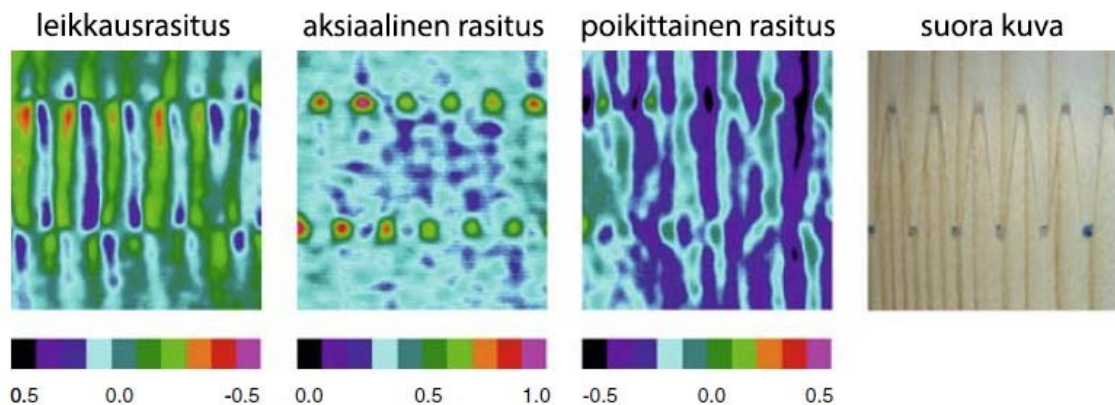
7. LIIMALIITOKSET

Liimaliitoksia käytetään valmistusteollisuudessa puukappaleiden jatkamiseen ja rinnakkain liittämiseen. Liimaliitokset ovat luvanvaraisia ja vaativat tarkat tuotanto-olot, jonka takia liimaliitoksia ei toteuteta työmaalla. [2, s. 69]

Liimaliitos on jäykin ja lujin puuliitosmenetelmä. Liitoksen suunnitteluun on ohjeita, mutta kaikkien toteutettujen liitostyyppien lujuus on todennettava asetettujen standardien mukaan. [6] Tässä työssä käsitellään liimaliitoksen esimerkkinä liitosta, jossa kaksi puukappaletta on liitetty toisiinsa liimalla sormijatkettua.

7.1 Käyttäytyminen kuormitettuna

Liimaliitos on täysin jäykkä liitos, eikä salli liitokselle taipumaa murtumatta. Liimaliitokset ovat huomattavasti mekaanisia liitoksia lujempia ja jäykempiä [14]. Kuormitukset siirtyvät puukappaleelta toiselle liiman ja liimattujen kosketuspintojen kautta. Sormijatkoksessa on hammastuksesta johtuen enemmän kosketuspinta-alaa, kuin liimattavan kappaleen kohtisuoralla pinta-alalla. Kuvassa 13 on esitetty sormiliitoksen rasitusten jakautuminen vetorasitettuna.



Kuva 13. Rasitusten jakautuminen vetorasituksella kuormitetussa sormiliitoksessa [15].

Sormiliitoksessa rasitukset jakautuvat hammastuksen sivuilla hyvin tasaisesti, luoden vain paikallisia lisääntyneitä leikkausvoimia. Suurin rasitus syntyy hammastuksen päihin, joissa on paksuin liimakerros. [15]

7.2 Kestävyyden todentaminen

Liimaliitoksille ja esimerkiksi liimalla liitettäville sormijatkoksille on ohjeistuksia, mutta standardoitua mitoitusmenetelmää ei ole. Liimaliitoksella voidaan toteuttaa liitos, joka

kestää enemmän taivutusta ja vetoa kuin liitettävä puukappale. Tämä onkin vaatimuksena liimaliitosten toteuttamiseen. [6]

Rakenteellista sormijatkettua sahatavaraa käsittelee standardi SFS-EN 15497 [6]. Liimaliitosten käyttäminen tuotannossa vaatii aina standardien mukaisen lujuuden todentamisen ja dokumentoinnin. Oikein määritettyjen ja dokumentoitujen ominaisuuksien jälkeen voidaan sormijatkettu sahatavara luokitella ominaisuuksia vastaavan puutavaran, joissa ei ole sormijatkoksia, mukaisesti.

Sormiliitoksen kestävyys todetaan taivutuslujuustestillä standardin SFS-EN 15497 mukaisesti. Testattavan kappaleen tulee olla valmistajan toimittamaa tuotetta vastaava. Taivutustestit suoritetaan kappaleen ollessa lappeellaan, tai neliömäisten poikkileikkausten tapauksessa liitoksen sormien on oltava näkyvissä kuormitussuunnalle yhdensuuntaisella pinnalla. Myös syrjätaivutuslujuus on ilmoitettava, mutta sen tulos voidaan selvittää laskennallisesti lapetaivutuksen tuloksesta. [6]

Tuotantolinjan ilmoittama taivutuslujuus hyväksytään, jos sadasta viimeisimmästä testituloksesta korkeintaan viisi arvoa alittavat ilmoitetun lujuuden, eikä yksikään tulos ole alle 80 prosenttia ilmoitetusta lujuudesta. [6]

8. YHTEENVETO

Puuosien liitoksiin on useita eri ratkaisuja ja ratkaisujen yhdistelmiä. Kaikilla liitostyypeillä on omat hyvät ja huonot puolensa, jotka on tunnistettava rakenteita suunniteltaessa. Puun lujuusominaisuudet vaihtelevat käytetyn puun ja kuormitussuuntien mukaan ja tästä syystä liitosten suunnitteleminen on monimutkaisempaa kuin esimerkiksi metallirakenteissa.

Liitokset voidaan jakaa mekaanisiin liitoksiin sekä liimaliitoksiin, tai liitosten standardien mukaisen hyväksymismenettelyiden perusteella. Hyväksymismenettelyt määrittävät miten liitokset on suunniteltava sekä millaisilla oloissa ja millä menettelyillä liitokset voidaan toteuttaa rakenteellisiin ratkaisuihin.

Pulttiliitokset soveltuvat isompien kappaleiden, esimerkiksi hallirakenteiden pilarien ja palkkien, toisiinsa liittämiseen työmaalla ja teollisissa tiloissa. Pulttiliitos voidaan toteuttaa tarpeen mukaan momenttia vastustavana tai joustavana nivelenä. Huomattavin pulttiliitoksen käyttäytymisen eroavaisuus muihin liitoksiin, on suuri alkusiirtymä pultin akselille kohtisuoran kuormituksen alkaessa.

Naulaliitoksia käytetään kevyemmissä rakenteissa, kuten pientalojen puurankarungoissa. Liitoksessa on aina useita nauloja yksittäisen naulan pienestä kuormansiirtokyvystä johtuen. Naulaliitokset joustavat hyvin pienillä taipumilla, mikä mahdollistaa naulojen käyttämisen liitoksissa, joille voi kohdistua taipumaa esimerkiksi rakenteiden taipumista johtuen.

Naulalevyliitoksia käytetään puukappaleiden jatkamiseen sekä ristikkorakenteiden solmukohtien sitomiseen. Naulalevyt koostuvat metallilevystä, johon on lävistetty ja taivutettu ulokkeita, jotka toimivat nauloina. Naulalevyliitos on jäykin mekaanisista liitoksista.

Liimaliitoksia esiintyy teollisten valmistustuotteiden jatkoksissa sekä levyjen ja muiden yhteen liitettyjen puukappaleiden saumoissa. Rakenteellisten liimaliitosten toteuttaminen vaatii tarkkaa dokumentointia ja tuotetestausta. Liimaliitos on puuliitosmenetelmistä jäykin ja kestävin.

Eri puuliitostyyppien välillä on huomattavia eroja erityisesti asennettavuuden, mitoituksen, lujuuden, taivutuksen vastustamisen ja joustavuuden osalta. Rakenneosaa suunniteltaessa on ymmärrettävä liitoksen toiminta ja toteuttaminen, joiden perusteella voidaan valita oikea liitostyyppi. Oikean liitostyyppin valinta mahdollistaa rakenteen toiminnan suunnitellun mukaisesti.

LÄHTEET

- [1] H. Salinen, RAK-32120 Puu- ja teräsrakenteiden perusteet, Puurakenteet luento 170208 Mekaaniset liitokset, TTY, 2017, 61 s.
- [2] U. Siikanen, Puurakentaminen, Rakennustieto Oy, 2016, 332 s.
- [3] RIL 205-1-2017 Puurakenteiden suunnitteluohje Eurokoodi, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2017, 231 s.
- [4] K. Sawata, Strength of bolted timber joints subjected to lateral force, *Journal of Wood Science*, Vol. 61, Iss. 3, 2015, pp. 221–229. Saatavissa <https://link-springer-com.libproxy.tut.fi/article/10.1007/s10086-015-1469-8>.
- [5] J.N. Karadelis, P. Brown, Punched metal plate timber fasteners under fatigue loading, *Construction and Building Materials*, Vol. 14, Iss. 2, 2000, pp. 99–108. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061800000155>.
- [6] SFS-EN 15497 Rakenteellinen sormijatkettu sahatavara. Toiminnalliset vaatimukset ja vähimmäisvaatimukset tuotannolle, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2014, 58 s.
- [7] SFS-EN 1995-1-1 Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2014, 224 s.
- [8] SFS-EN 14545:2008 Puurakenteet. Puurakenteiden liittimet. Vaatimukset, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2008, 36 s.
- [9] M. Noguchi, K. Komatsu, A new method for estimating stiffness and strength in bolted timber-to-timber joints and its verification by experiments (II): bolted cross-lapped beam to column joints, *Journal of Wood Science*, Vol. 50, Iss. 5, 2004, pp. 391–399. Saatavissa: <https://link-springer-com.libproxy.tut.fi/article/10.1007/s10086-003-0606-y>.
- [10] A. Awaludin, T. Hirai, T. Hayashikawa, Y. Sasaki, A. Oikawa, Effects of pretension in bolts on hysteretic responses of moment-carrying timber joints, *Journal of Wood Science*, Vol. 54, Iss. 2, 2008, pp. 114–120. Saatavissa: <https://link-springer-com.libproxy.tut.fi/article/10.1007/s10086-007-0914-8>.
- [11] E. Meghlat, M. Oudjene, H. Ait-Aider, J. Batoz, A new approach to model nailed and screwed timber joints using the finite element method, *Construction and*

Building Materials, Vol. 41, 2013, pp. 263–269. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181200904X>.

- [12] P. Kauranen, Selvitys naulalevyliitoksen jäykkyydestä, Diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 1979, 188 s.
- [13] P. Kuula, Naulalevyrakenteiden ohjelmallinen mitoitus, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2014, 94 s.
- [14] S. Myslicki, T. Vallée, F. Walther, Short-time procedure for fatigue assessment of beech wood and adhesively bonded beech wood joints, *Materials and Structures*, Vol. 49, Iss. 6, 2016, pp. 2161–2170. Saatavissa: <http://link.springer.com.libproxy.tut.fi/article/10.1617/s11527-015-0640-4>.
- [15] J. Konnerth, A. Valla, W. Gindl, U. Müller, Measurement of strain distribution in timber finger joints, *Wood Science and Technology*, Vol. 40, Iss. 8, 2006, pp. 631–636. Saatavissa: <https://link-springer-com.libproxy.tut.fi/article/10.1007/s00226-006-0090-9>.