

TIINA VUORINEN JORMA JANTUNEN

**JÄREÄN SAHATAVARAN KÄYTTÖ RAKENNUKSISSA,
RAKENNEJÄRJESTELMÄT JA LIITOKSET**

**THE LARGE-SCALE TIMBER IN CONSTRUCTION,
STRUCTURAL SYSTEMS AND CONNECTIONS**



VAKOLAN TUTKIMUSSELOSTUS 71

MAATALOUDEN TUTKIMUSKESKUS

VIHTI 1997

MAATALOUDEN TUTKIMUSKESKUS
Agricultural Research Centre of Finland

VAKOLA

Maatalousteknologian tutkimuslaitos

Institute of Agricultural Engineering

Osoite
Vakolantie 55
03400 VIHTI
Puhelin
(09) 224 251
Telekopio
(09) 224 6210

Address
Vakolantie 55
FIN-03400 VIHTI
FINLAND
Telephone int.
+358 9 224 251
Telefax int.
+358 9 224 6210

TIINA VUORINEN JORMA JANTUNEN

**JÄREÄN SAHATAVARAN KÄYTTÖ RAKENNUKSISSA,
RAKENNEJÄRJESTELMÄT JA LIITOKSET**

**THE LARGE-SCALE TIMBER IN CONSTRUCTION,
STRUCTURAL SYSTEMS AND CONNECTIONS**

VAKOLAN TUTKIMUSSELOSTUS 71

MAATALOUDEN TUTKIMUSKESKUS

VIHTI 1997

SISÄLLYSLUETTELO

KUVAILULEHDET

ALKULAUSE

KÄYTETYT MERKINNÄT

1	JOHDANTO	9
1.1	Järeän puun käyttökohteet	9
2	JÄREIDEN PUURAKENTEIDEN SUUNNITTELUUN JA MITOITUKSEEN LIITTYVIÄ ERITYISPIIRTEITÄ	10
3	JÄREÄN SAHATAVARAN RAKENNEJÄRJESTELMÄT	13
3.1	Pilari-palkki-järjestelmä	13
3.2	Kehärakenteet	15
3.3	Kantavat seinät -järjestelmä	16
3.4	Laatta- ja arinarakenteet	18
4	JÄREÄN PUUN LIITOKSET	19
4.1	Mekaanisin liittimin tehdyt liitokset	21
4.1.1	Naulalevyliitokset	24
4.1.2	Naula- ja naulauslevyliitokset	25
4.1.3	Pulttiliitokset	27
4.1.4	Vaarnaliitokset	29
4.1.4.1	Tappivaarnaliitokset	31
4.1.4.2	Hammas-, ura- ja suorakaidevaarnaliitokset	33
4.1.5	Metalliset liitoselimet	40
4.2	Kontaktiliitokset	42
4.2.1	Vinokulmainen loviliitos	44
4.2.1.1	Vinokulmaisen loviliitoksen plastinen mitoitus vitaposkirakenteessa	52
4.2.2	Lohenpyrstöliitos	54
4.3	Erikoisliitokset	60
4.3.1	Betonin käyttö liitoksissa	60
4.3.2	Pyöreän puun erikoisliitokset	61
5	JÄREÄN PUUN VAHVISTAMINEN	62
6	JÄREÄN SAHATAVARAN KÄYTTÖSOVELLUTUKSIA	64
6.1	Vitaposkirakenne	64
6.2	Hallien ja varastotilojen runkojärjestelmät	65
6.3	Asuinrakennukset	72
7	RAKENTEIDEN JA LIITOSTEN KOESTAMINEN	77
7.1	Vinokulmaisiin loviliitoksiin koottu kolmioristikko	79
7.1.1	Kolmioristikoiden valmistus	79
7.1.2	Rakenteiden koestus	81

7.1.3	Tulosten analysointi	84
7.1.4	Johtopäätökset	88
7.2	Lohenpyrstöliitoksen koottu kolmioristikko	89
7.2.1	Kolmioristikoiden valmistus	89
7.2.2	Rakenteiden koestus	91
7.2.3	Tulosten analysointi	93
7.2.4	Johtopäätökset	95
8	YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT	96
	KIRJALLISUUSLUETTELO	100

Tekijät (toimielimestä: toimielimen nimi, puheenjohtaja, sihteeri)		Julkaisun laji	
Tiina Vuorinen Jorma Jantunen		Tutkimusselostus	
		Toimeksiantaja	
		Toimielimen asettamispvm	
Julkaisun nimi (myös ruotsinkielinen)			
Järeän sahatavaran käyttö rakentamisessa, rakennusjärjestelmät ja liitokset			
Julkaisun osat			
Tiivistelmä			
<p>Tutkimus käsittelee järeän sahatavaran käyttöä rakennuksissa sekä järeälle puulle sopivia rakennejärjestelmiä ja liitoksia. Tutkimuksessa ei ole käsitelty hirsirakenteita. Selvitys perustuu kirjallisuuteen sekä laskelmiin ja laboratorikokeisiin.</p> <p>Järeällä sahatavarella tarkoitetaan normaalia sahatavaraa suurempaa sahatavaraa, jonka leveys on 75...150 mm ja korkeus 225...350 mm ja pituus jopa 10 m. Kappaleet voidaan sahata pituussuunnassa kiilamaisiksi, jolloin raaka-aineen käyttö tehostuu ja sahatavaran syyrakenne on ehjempi kuin normaalilla sahatavarella. Järeästä sahatavarasta valmistetuilla palkeilla ja kehärakenteilla voidaan usein korvata työtä ja esivalmistusta vaativat ristikko- ja palkkirakenteet jopa 12 metrin jänneväliin asti. Ratkaisuja voi käyttää rakennusten kantavissa rakenteissa, silloissa, maanpaineisissa, meluaidoissa, liikennemerkki- ja johtokannattimissa sekä erikoisrakenteissa, kuten torneissa ja hyppyrimäissä.</p> <p>Rakennejärjestelmiä suunniteltaessa kiinnitetään erityistä huomiota kosteusmuodonmuutoksiin ja puun halkeilun vaikutukseen. Pilari-palkki-järjestelmässä palkkien jänneväli voi olla 6 m. Järjestelmä sopii karsinaratkaisuihin perustuviin maatalouden tuotantotiloihin sekä asuinrakennuksiin. Järeästä puusta tehtyjen kehien jänneväli voi olla 12 m. Kehiä käytetään halleissa, varastoissa sekä maatalouden ja teollisuuden tuotantotiloissa. Kantavat seinät -järjestelmässä järeää sahatavaraa käytetään pääasiassa kantavissa vaakarakenteissa. Järeää sahatavaraa käyttäen voi toteuttaa jäykän välipohjan jännemitaltaan 3,6...4,8 m. Kantavat seinät järjestelmää käytetään asuin- ja tuotantorakennuksissa.</p> <p>Järeästä puusta tehdyissä rakenteissa liitoksiin kohdistuu suuret rasitukset. Järeän sahatavaran kosteus asennettaessa on yleensä $18\% \pm 2\%$. Mikäli puu kuivuu käyttöolosuhteissa, on järeän puun liitokset suunniteltava siten, että ne eivät estä puun kosteusmuodonmuutoksia. Liitokset on tutkimuksessa jaettu kolmeen ryhmään: mekaanisin liittimin tehdyt liitokset, kontaktiliitokset ja erikoisliitokset. Järeän sahatavaran liitoksissa hyviä liittostyyppejä ovat mekaanisista liittimistä vaarnat sekä kontaktiliitokset.</p> <p>Työssä on tutkittu kokeellisesti kahta kontaktiliitosta: vinokulmaista loviliitosta ja lohenvyrstöliitosta. Liitoksien tutkimiseksi valmistettiin 5 kolmioristikkoa, joissa ala- ja yläpaarteet liitettiin kontaktiliitoksien avulla. Liitokset työstettiin moottorisahalla, jolla valmistus oli helppoa ja nopeaa. Valmistustarkkuus kärsi karkeasta valmistustekniikasta, mutta tehdyissä kokeissa saadut murtokuormat olivat epätarkkuuksista huolimatta 1,3...4,0 -kertaisia vertailukuormiin nähden. Vinokulmaisen loviliitoksen kapasiteetti oli suuri ja jäykkyys lähes yhtä hyvä kuin vaarnaliitoksen. Lohenvyrstöliitoksen kapasiteetti oli pienempi kuin vinokulmaisen loviliitoksen, mutta liitos oli varsin sitkeä.</p>			
Avainsanat (asiasanat)			
Puu, sahatavara, rakennejärjestelmä, liitokset			
Muut tiedot			
Saatavana Maatalouden tutkimuskeskuksen maatalousteknologian tutkimuslaitokselta (MTT/VAKOLA)			
Puhelin (09) 224 251			
Telekopio (09) 224 6210			
Sarjan nimi ja numero		ISSN	ISBN
VAKOLAn tutkimusselostus 71		0782-0054	
Kokonaissivumäärä	Kieli	Hinta	Luottamuksellisuus
Jakaja		Kustantaja	
VAKOLA, Vakolantie 55, 03400 VIHTI			

Authors (if organ: name of organ, chairman, secretary) Tiina Vuorinen Jorma Jantunen	Type of publication Study report	
	Comissioned by	
	Date of setting up organ	
English and Swedish title of publication The usage large-scale timber in construction, structural systems and connections		
Parts of publication		
Abstract The study discusses the usage of large-scale timber in constructions as well as the structural systems and connections suitable for it. In the report the log structures are excluded. The report is based on literature, calculations and laboratory tests. The large timber is here sawn timber: the breadth is 75-150 mm, the height 225-350 mm and the length up to 10 m. Timber can be sawn tapered in which case the grain structure of large timber is more unbroken than that of normal sawn timber. The truss and beam structures demanding preparations can often be replaced by beams and frames constructed of large timber up to the span of 12 m. The large timber can be used in the bearing structure of various buildings, in bridges, in earth pressure walls and noise walls, in the supporting columns of traffic signs and wires and in special structures (towers, ski jumps). In designing of structural systems attention has to be paid the special features of large timber (the dimensional changes of timber caused by the changing moisture content). In the post-and-beam constructions the span of the beams can be about 6 m. The beams supported by posts can be used in agricultural buildings as well as in residential buildings. The span of the simple frames of large timber can be about 12 m. The consumption of wood in frames can be optimised with tapered large timber. Frames can be used in halls, warehouses as well as in agricultural and industrial buildings. In bearing wall constructions the main usage of large timber is in bearing horizontal structures. The floor made of large timber can be made very rigid. The span of the floor is 3.6-4.8 m. Bearing wall system can be used in residential and production buildings. In structures made of large timber great loads are concentrated on the joints. The moisture content of large timber, while installing, is usually $18\% \pm 2\%$. If timber dries in the usage circumstances, the connections have to be designed to not to prevent the dimensional changes of timber caused by the changing moisture content. In the report the connections have been divided into 3 groups: mechanical connectors, traditional connections and special connections. The dowels, the shear connectors and the traditional connections are good connection types for the large timber. Two of the traditional connections have been studied in the report: the notched joint and the dovetail joint. To research the connections, five triangular trusses, in which the lower and upper chords were joined by traditional connections, were made. The connections were made with chain saw, easily and quickly. The accuracy of manufacture suffered from the rough techniques, but despite this the breaking loads, in the tests made, were 1.3-4.0 times the comparison loads. The capacity of the notched joint was great and its stiffness almost as good as that of the shear connectors. Although the capacity of the dovetail joint was smaller, the connection was very tough.		
Key words Wood, timber, structural system, joints		
Additional information MTT/VAKOLA Telephone +358 9 224 251 Telefax +358 9 224 6210		
Name of series, number VAKOLAn tutkimusselostus 71		ISSN 0782-0054
Name of series, number VAKOLAn tutkimusselostus 71		ISBN
Pages	Language Finnish, tables and figures: English, Summaries: English, Swedish	
Sold by VAKOLA, Vakolantie 55, FIN 03400 VIHTI, FINLAND		Price FIM

ALKULAUSE

VAKOLAssa aloitettiin keväällä 1993 tutkimus, jossa haetaan ratkaisuja järeän puun jalostusarvon kohottamiseen. Tutkimuksessa selvitetään mahdollisuuksia käyttää rakentamisessa tavallista suurempaa sahatavaraa, jonka poikkileikkaus on 75 x 250 mm - 200 x 350 mm ja pituus 6-10 m.

Tutkimusta rahoittivat Maatilatalouden kehittämisrahasto ja Maatalouden tutkimuskeskus. Tutkimuksen valvojakuntaan kuuluivat osastopäällikkö Pekka Airaksinen puheenjohtajana ja jäsenenä ins. Kjell Brännäs, prof. Pekka Kanerva, MMT Tarmo Luoma ja prof. Tuija Vihavainen. Valvojakunnan sihteerinä ja päätutkijana on toiminut Jorma Jantunen.

Tässä osatutkimuksessa selvitetään järeän sahatavaran käyttökohteita rakentamisessa, rakennejärjestelmiä ja liitoksia sekä järeästä sahatavarasta tehtyjen puurakenteiden suunnitteluun liittyviä erityiskysymyksiä.

Tiina Vuorisen diplomityönään tekemää osatutkimusta valvoi Teknillisessä korkeakoulussa prof. Pekka Kanerva ja työtä on ohjannut DI Jorma Jantunen. Järeän sahatavaran liitoskokeet on tehty TKK:n talonrakennustekniikan laboratoriossa, osittain puurakenteiden yleisopintojakson laboratorioharjoitusten yhteydessä. Kokeissa käytetty puu on hankittu VAKOLAn metsästä.

Haluamme esittää kiitokset valvojakunnalle, Pekka Kanervalle, VAKOLAn henkilökunnalle sekä TKK:n rakennusosaston talonrakennustekniikan oppituolin ja koehallin henkilökunnalle.

Tiina Vuorinen

Jorma Jantunen

KÄYTETYT MERKINNÄT

A	Poikkileikkausala
D, H, N	Normaalivoima
E	Kimmomodulli
F	Rakenteeseen vaikuttava voima
F_{murto}	Murtokuorma
F_{red}	Redusoitu murtokuorma
M	Taivutusmomentti
Q_k	Käyttökuorma
Q_{max}	Murtokuorman vertailuarvo
S	Sauvavoima
S_{max}	Sauvavoiman maksimiarvo
V	Leikkausvoima; Poikittaisvoima
W	Taivutusvastus
b	Poikkileikkauksen leveys
f_b	Taivutuslujuus
f_c	Puristuslujuus
$f_{c\perp}$	Puristuslujuus kohtisuoraan syitä vastaan
f_t	Vetolujuus
$f_{t\perp}$	Vetolujuus kohtisuoraan syitä vastaan
f_v	Leikkauslujuus
f_α	Hankinsonin kaavalla laskettu puristuslujuus tietyssä kulmassa α syysuuntaan nähden
h	Poikkileikkauksen korkeus
k	Siirtymäkerroin; Rakenneosien välinen etäisyys
l	Jänneväli pituus
t_v	Lovisyvyys korkeussuunnassa
t_h	Lovisyvyys leveyssuunnassa
ε	Suhteellinen venymä
σ_b	Taivutusjännitys
σ_c	Puristusjännitys
σ_t	Vetojännitys
τ	Leikkausjännitys

1 JOHDANTO

Suomessa on yleistä soiorakenteiden käyttö runkorakenteissa. Normaalin sahatavaran suurimpana poikkileikkauksena on $75 \times 225 \text{ mm}^2$. Asuinrakennuksissa ja muissa lämpöeristetyissä rakennuksissa kantava runko on rakennusvaipan sisällä. Järeämmän puutavaran käytölle on kuitenkin perinteitä Suomessa. Vanhoissa rakennuksissa järeä välipohjapalkisto on usein jätetty näkyviin, samoin hirsiseinät. Järeästä puusta tehdyt pilari-palkki- ja ristikko-rungot ovat edelleen hyvin yleisiä Keski-Euroopassa.

Kun tarvitaan suurta kantavuutta ja pitkäköille jänneväleille sopivia rakenteita, turvaututaan liimattuihin tai ristikkorakenteisiin. Massiivista sahatavaraa on yleensä saatavana vain tilauksesta, ja sen halkeilu sekä kuivumismuodonmuutokset koetaan haittana. Lisäksi järeän puun liitos- ja asennustekniikka ovat kehittymättömiä.

Suomen metsät kasvavat enemmän kuin niistä hakataan, jolloin puusto kasvaa ylikokoiseksi sahateollisuuden tarpeisiin. Kun järeäksi tukiksi määritellään rinnankorkeuslöpimitaltaan 30 cm:ä suuremmat havupuut, saadaan järeän kuusen kokonaistilavuudeksi Etelä-Suomessa noin 149 milj.m^3 ja männyn 132 milj.m^3 . Viimeisten kymmenen vuoden aikana järeän kuusen osuus kuusipuustosta on kasvanut reilulla viidellä prosentilla, ja järeän männyn osuus mäntypuustosta runsaalla prosentilla /1/. Metsäteollisuusyritykset eivät voi hyödyntää suurinta osaa järeistä tukeista, mutta kenttäsiirkeillä voidaan sahata jopa 10 m pitkä ylikokoinen tukki sahatavaraksi.

Työssä selvitetään järeän sahatavaran käyttöä rakennuksissa sekä järeän sahatavaran rakennejärjestelmiä ja liitoksia. Järeän puun liitoksien yhteydessä tutkitaan tarkemmin kontaktiliitoksia, joille esitetään myös mitoitusohjeet. Tutkimuksen tavoitteena on esittää järeä sahatavara yhtenä ainevaihtoehtona rakenne- ja rakennussuunnittelijoille. Selvitys perustuu kirjallisuuteen, laskelmiin ja laboratoriokokeisiin. Tutkimuksessa ei käsitellä hirsirakenteita.

Järeällä sahatavaralla tarkoitetaan sahatavaraa, jonka leveys on vähintään 75 mm, korkeus yli 225 mm ja pituus jopa 10 m.

1.1 Järeän puun käyttökohteet

Järeän sahatavaran käyttökohteita ovat esimerkiksi /2/ :

- asuinrakennuksien, hallien sekä kotieläinsuojien, varastojen ja erilaisten tuotantotilojen runkorakenteet
- urheilukenttien ja asemien katokset
- kevyen liikenteen sillat ja lyhyet tai väliaikaiset ajoneuvoliikenteen sillat
- telinerakenteet ja väliaikaiset tukirakenteet sekä muotit
- meluaidat ja muut aidat
- maanpaineseinät
- liikennemerkkien kannatteet ja voimajohtokannattimet
- portaat
- erilaiset erikoisrakenteet (hyppyrimäet, näköalatornit, tuuligeneraattorit)

Rakennusryhmittäin tarkasteltuna on puun käyttö yleisintä pientaloissa, joissa järeää puuta voidaan käyttää erityisesti vaakarakenteissa. Puurunkoisen rakennuksen lämmöneristys on teknisesti ja taloudellisesti helppo toteuttaa ja puurakenne sallii kivirakenteita paremmin muodonmuutoksia ja siirtymiä. Keski-Euroopassa rakennetut puiset julkiset rakennukset, kuten erilaiset kirkot, asemarakennukset ja näyttelyhallit ovat hyviä esimerkkejä järeän puun käyttömahdollisuuksista.

Suomessa palomääräykset rajoittavat puun käytön rakennuksissa korkeintaan kaksikerroksisiin rakennuksiin, kun esimerkiksi Yhdysvalloissa voidaan osavaltiosta riippuen rakentaa 5 - 6 kerrosta puusta. Vaadittava palonkestoluokka B60 on saavutettavissa käyttämällä järeää sahatavaraa ja palamattomia levyjä.

2 JÄREIDEN PUURAKENTEIDEN SUUNNITTELUUN JA MITOITUKSEEN LIITTYVIÄ ERITYISPIIRTEITÄ

Puurakenteiden suunnittelussa on muihin materiaaleihin nähden erityisiä piirteitä johtuen puun anisotrooppisuudesta ja kosteusmuodonmuutoksista sekä virumisesta. Puussa on aina oksia ja erilaisista kasvuolosuhteista johtuvia vikoja, kuten lylyä, vino- ja kierresyisyyttä, haavoja, halkeamia sekä erilaisia sieni- ja hyönteisvaurioita, jotka aiheuttavat suurta hajontaa puun ominaisuuksissa. Kuivauksen aikana voi myös tapahtua vaurioita.

Rakennejärjestelmissä käytettävän puutavaran pituus voi olla jopa 10 m, mutta pituutta rajoittaa sahaustekniikka sekä rakenneosien paino. Taulukossa 2.1 on esitetty mahdollisia järeän sahatavaran poikkileikkauksia ja painoja.

Taulukko 2.1. Järeän sahatavaran mitat ja painot juoksumetriä kohden, kun järeän puun tiheydeksi oletetaan 20 %:n kosteudessa 500 kg/m³.

Table 2.1. Dimensions, sizes and weight for large sized timber, when the density of wood in 20% moisture content is 500 kg/m³.




Kappaleiden paino on merkitty yksiköissä kN/m, joka on 1000/9,81 kg/m (eli noin 100 kg/m).

The weights are in kN/m, which is 1000/9.81 kg/m (about 100 kg/m).

Poikkileikkausmittojen, korkeuden h ja leveyden b, yksikkönä on mm.

The height h and the width b of the cross-section are in mm.

h	b	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
175		0,064	0,086	0,107	0,129	0,150	0,172	0,193	0,215	0,236	0,258
200		0,074	0,098	0,123	0,147	0,172	0,196	0,221	0,245	0,270	0,294
225		0,083	0,110	0,138	0,166	0,193	0,221	0,248	0,276	0,303	0,331
250		0,092	0,123	0,153	0,184	0,215	0,245	0,276	0,307	0,337	0,368
275		0,101	0,135	0,169	0,202	0,236	0,270	0,303	0,337	0,371	0,405
300		0,110	0,147	0,184	0,221	0,258	0,294	0,331	0,368	0,405	0,441
325		0,120	0,159	0,199	0,239	0,279	0,319	0,359	0,399	0,438	0,478
350		0,129	0,172	0,215	0,258	0,300	0,343	0,386	0,429	0,472	0,515

-  Tukin latvaläpimitta alle 350 mm
Top diameter of log under 350 mm
-  Tukin latvaläpimitta yli 350 mm
Top diameter of log over 350 mm
-  Kosteusmuodonmuutosten
takia ei kannata käyttää
*Not worth using because of
moist-re lated deformation*

Puun muodonmuutos- ja lujuusominaisuudet riippuvat kuormituksen suunnan ja syiden suunnan välisestä kulmasta, kuormitusajasta, lämpötilasta, kosteudesta sekä puun tilavuuspainosta. Sekä kosteuden että lämpötilan kohotessa ja puun tiheyden pienentyessä puun lujuus- ja kimmomoduliarvot pienenevät. Puu on lisäksi viskoelastinen materiaali, joka kestää hetkellisesti suuriakin kuormia, mutta murtuu pitkäaikaisessa kuormituksessa lähes 50 % pienemmillä kuormilla. Pitkäaikaisessa kuormituksessa puu myös viruu. Muodonmuutoksen suuruus riippuu kosteudesta, jännitystasosta, lämpötilasta ja edellisten muutoksista. Havupuulle annetaan SRakMK:n /27/ mukaan ominaislujuudet ja kimmomodulit lujuusluokittain. Kosteus- ja aikaluokkien vaikutukset otetaan huomioon korjauskertoimilla.

Järeän sahatavaran lujuuden voidaan otaksua olevan parempi kuin normaalin sahatavaran, sillä järeässä ja erityisesti kiilamaisessa sahatavarassa säilyy puun syy rakenne ehjempänä kuin normaalissa sahatavarassa ja oksien koko suhteessa poikkileikkaukseen on pienempi. Lähteen /3/ mukaisesti järeän sahatavaran voidaan yleensä olettaa kuuluvan pyöreän puun tapaan lujuusluokkaan T30.

Oksien suuntaus rasiustilaan nähden on järeässä sahatavarassa edullisempi kuin normaali-sahatavarassa. Järeässä sahatavarassa oksat kulkevat ytimestä vinottain kasvaen kohti sahatavaran reunoja, jolloin ne heikentävät vähemmän puun poikkileikkausta ja lujuutta. Tyvipuu voi olla lähes oksatonta, jolloin sen lujuus on latvapuuta parempi.

Puu pyrkii hygroskooppisena materiaalina aina asettumaan ympäröivää ilmankosteutta vastaavaan tasapainokosteuteen. Maatalouden tuotanto- ja varastorakennusten sekä lämmittämättömien rakennusten ilmankosteudet vastaavat kosteusluokkaa 2, jolloin ulkokuivaa järeää puuta voidaan käyttää ilman kuivumisesta aiheutuvaa lisähalkeluvaa. Käytettäessä ulkokuivaa järeää puutavaraa rakennuksissa, joissa ilman kosteus on pieni, kuivuu puu kosteusluokkaan 1, jolloin puutavara kutistuu ja halkeilee. Puun kutistuminen alkaa, kun sen kosteus laskee alle soluseinien kyllästymispisteen, ja jatkuu melko lineaarisesti kunnes puu on täysin kuiva. Pintapuuta kuivuu ensin, jolloin se alkaa kutistua, vaikka sisäosa on vielä märkä. Järeän sahatavaran kosteus vaihtelee pääasiassa pintakerroksessa. Puun kuivuessa pinta- ja sydänpuun kosteusero aiheuttaa suurimmat jännitykset pintapuuhun, joka viruu ja halkeilee. Ydinkeskeinen järeä sahatavara halkeilee enemmän kuin sahatavara, jossa ei ole ydintä. Järeissä rakenteissa käytettävän puutavaran tulisi olla mahdollisimman lähellä rakenteen lopullista tasapainokosteutta.

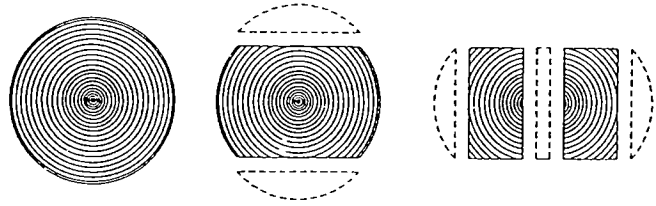
Järeän sahatavaran lujuuskokeissa todettiin halkeilun vaikutuksen puun lujuuteen, erityisesti leikkauslujuuteen olevan oletettua pienempi. Myös halkeilun jäykkyyttä alentava vaikutus oli vähäinen /3/. Koska vesi haihtuu nopeammin puun päistä kuin keskiosasta, halkeilevat puun päät runsaasti. Päätyhalkeilua voi vähentää käsittelemällä puun päät esimerkiksi nestemäisellä kosteussululla. Yleensä halkeilu keskittyy lappeen keskikolmannekseen, ja voi sydänkeskeisessä puussa ulottua läpi puunkin. Järeän sahatavaran halkeilua voidaan vähentää käyttämällä ytimen vierestä kuvan 2.1 mukaisesti sahattua puutavaraa, jolloin puun poikkileikkaus kuppiutuu tangentin ja säteen suuntaisen erisuuren kutistumisen takia. Tämä vaikeuttaa liitosten tekoa.

Järeissä puurakenteissa on yleensä vähän liitoksia, jolloin yksittäisiin liitoksiin kohdistuu suuremmat rasitukset kuin ristikko- tai soiorakenteissa. Puun kutistuminen aiheuttaa liitosalueelle halkeamia, jotka pienentävät liitoksen lujuutta ja jäykkyyttä sekä kasvattavat liitoksen siirtymiä. Tämä voi aiheuttaa liitettäviin kappaleisiin ylimääräisiä rasituksia ja rikkoo sekundäärirakenteita. Jos liitoksessa käytetyt liittimet on valittu

tai sijoitettu väärin, syntyy puuhun kutistumisen ja vääntymisen yhteydessä jännityksiä, jotka suurentavat halkeamia. Järeän ulkokuivan sahatavaran kosteus on yleensä $18\% \pm 2\%$, jolloin valmiissa rakenteessa joudutaan varautumaan puun kuivumiseen. Tällöin on liitoksissa varattava mahdollisuus myöhempään kiristykseen kutistumisen tapahduttua. Puurakenteisiin tehtävien liitoksien suunnittelussa on otettava huomioon, että puurakenteisiin ei voida tehdä täysin jäykkiä liitoksia. Useimmat mekaaniset liittimet sallivat kohtalaisen suuria muodonmuutoksia. Tapauskohtaisesti on pyrittävä arvioimaan, missä määrin liitoksen jäykkyys pystytään käytännössä saavuttamaan. Lisäksi on tutkittava, voiko liitoksen oletettua suurempi tai pienempi jäykkyys aiheuttaa vaurioita jossain osassa rakennetta.

Järeä sahatavara pyrkii kuivuessaan vääntymään myös pituussuunnassa. Vääntymistä voidaan vähentää kuivaamalla puu oikein. Järeä sahatavara tulee kuivata hitaasti taapeleissa, joissa puut niputettuina pysyvät suorina ja viruvat kuivumisen edistyessä. Oikein kuivattuna puun vääntyminen rakenteessa jää vähäisemmäksi, vaikka puuhun jää rajallisen kuivausajasta johtuen jäännösjännityksiä, jotka vapautuvat, mikäli puu kostuu kuivauksen jälkeen. Järeän sahatavaran vääntymistä rakenteessa voidaan vähentää riittävän tiheällä sivutuennalla sekä käyttämällä mahdollisimman lähellä lopullista tasapainokosteutta olevaa puuta. Myös kantavaan rakenteeseen liittyvien rakenteiden suunnittelussa on järeän sahatavaran vääntyminen otettava huomioon.

Järeän sahatavaran palonkesto on hyvä. Järeissä puurakenteissa puun pintaosa hiiltyy noin $0,7\text{--}0,8\text{ mm/min}$, ja järeän sahatavaran suuret halkeamat nopeuttavat hiiltymistä. Suomessa puurakenteiden paloluokittelun mukaan puuta voidaan käyttää B-luokan materiaalina kantavissa rakennusosissa paloahdastavissa ja paloapidättävissä kaksikerroksisissa rakennuksissa kellaria lukuunottamatta. Monissa maissa järeää puuta voidaan käyttää paloteknisesti vaativissakin rakenteissa, jolloin järeälle puulle asetetaan rakennusnormeissa minimikoko rakenneosasta riippuen.



Kuva 2.1. Järeän sahatavaran sahaus siten, että ydin ei jää puuhun, jolloin palkkien kuivumisen aiheuttama halkeilu on mahdollisimman vähäistä /5/.

Figure 2.1. When the large size timber is sawn the way that the core is not in the section, cracking of wood section is minor.

3 JÄREÄN SAHATAVARAN RAKENNEJÄRJESTELMÄT

Järeällä sahatavaralla voidaan korvata liimatut rakenteet ja ristikot tiettyyn jännemittaan asti. Tutkitut rakennejärjestelmät on jaettu viiteen ryhmään vaaka- ja pystyrakenteiden mukaan: pilari-palkki-järjestelmät, kehät, kantavat seinät -järjestelmät, arinat ja laatat.

Koska puurakennus on kevyt, on tuulikuormien aiheuttamien pysty- ja vaakavoimien tasapainottamiseen kiinnitettävä erityistä huomiota. Jäykistävänä rakenteena voivat olla levyt tai ristikot. Syntyvät vaakavoimat voidaan ottaa vastaan myös maahan upotetuilla pylväillä tai jäykästi kiinnitetyillä pilareilla eli mastopilareilla. Kehärakenteet ovat stabiileja rakenteita tasonsa suunnassa, vaikkakin kehäjäykistykselle on ominaista suuret muodonmuutokset, jotka aiheutuvat liitoksissa tapahtuvista siirtymistä.

3.1 Pilari-palkki-järjestelmä

Suomessa pilari-palkki-järjestelmää on käytetty erilaisissa halli- ja varastorakennuksissa sekä maatalouden tuotantotiloissa, mutta Keski-Euroopassa järjestelmää käytetään myös asuinrakennuksissa. Pilarit muodostavat ruudukon, jonka sivun pituus on järeää sahatavaraa käytettäessä 3,6...6 m. Pilarien välimatkaa voidaan kasvattaa käyttämällä vitaposkia tai vinotukia. Samalla vitaposket ja vinotuet jäykistävät rakenteen tasonsa suunnassa.

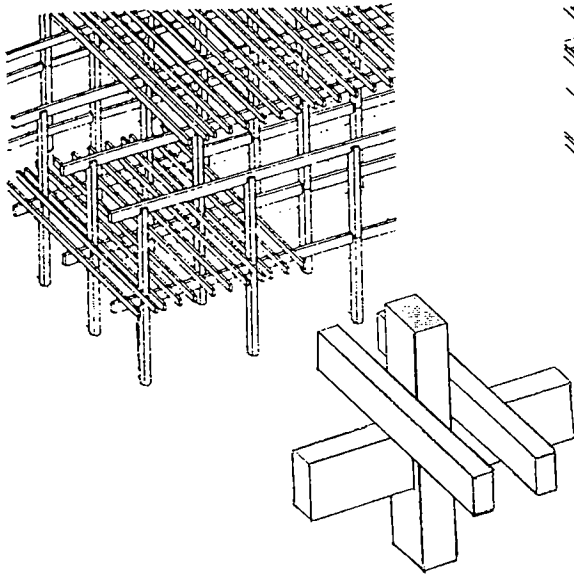
Yksiaukkoisten palkkien taipumat muodostuvat usein epäedullisen suuriksi, mikä rajoittaa jänneväliä. Palkki, jonka toisessa tai molemmissa päissä on uloke, on taipumien suhteen edullisempi rakenne. Taipumat eivät saa kasvaa niin suuriksi, että niistä aiheutuu haittaa liittyville rakenteille tai tilassa suoritettavalle toiminnalle.

Jatkuvat palkit voivat olla useampiaukkoisia riippuen saatavan puutavaran ja kenttien pituuksista. Jatkuvien palkkien kenttämomentti ja taipumat jäävät pienemmeksi yksiaukkoiseen palkkiin nähden. Koska momenttijäykkyä jatkos on on vaikea tehdä, voidaan jatkos tehdä nivelellisenä kenttämomentin nollakohtaan, jolloin kyseessä on nivelpalkki.

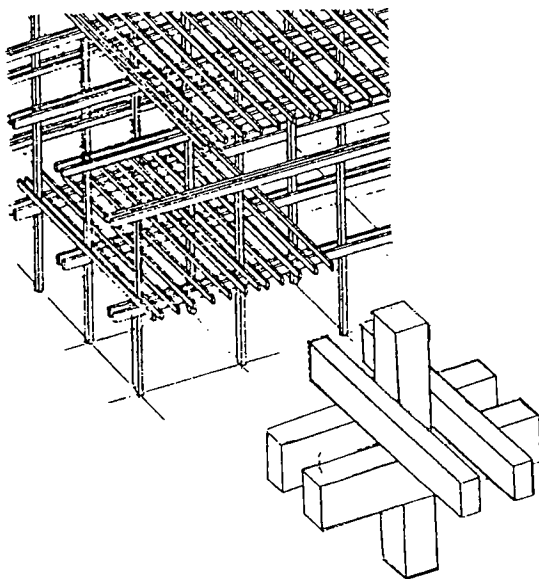
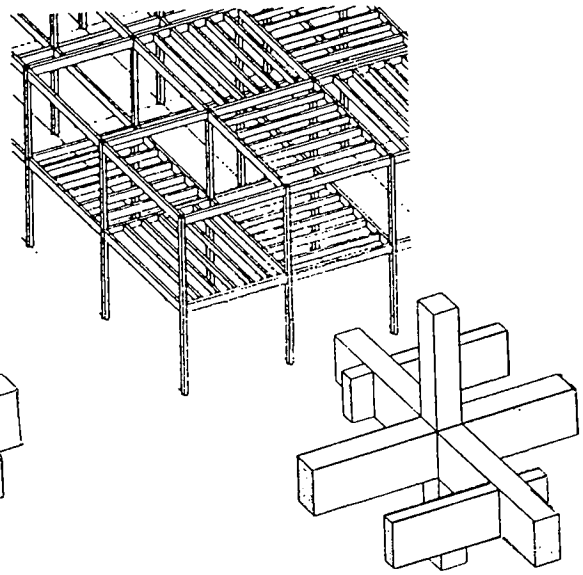
Sekundääripalkit tuetaan joko primääripalkkien päälle tai liitetään primääripalkkien kylkeen, jolloin rakennekorkeus pienenee.

Pilari-palkki-järjestelmässä pilarit ja palkit voivat olla yksiaukkoisia tai jatkuvia. Jatkuvia palkkeja käytettäessä palkki voidaan tukea suoraan pilarin päälle. Kun pilarit tehdään jatkuvina, liitetään palkit pilarin sivuille esimerkiksi metallikenkien avulla. Mikäli pilarit tai palkit tehdään kaksiosaisina, voivat molemmat olla jatkuvia. Tällöin liitokset on helppo tehdä pultti- tai vaarnaliitoksina. Jatkuvien ja yksiaukkoisten pilarien ja palkkien käyttömahdollisuuksia on esitetty kuvassa 3.1. Pilari-palkki-järjestelmät on esitetty taulukossa 3.1.

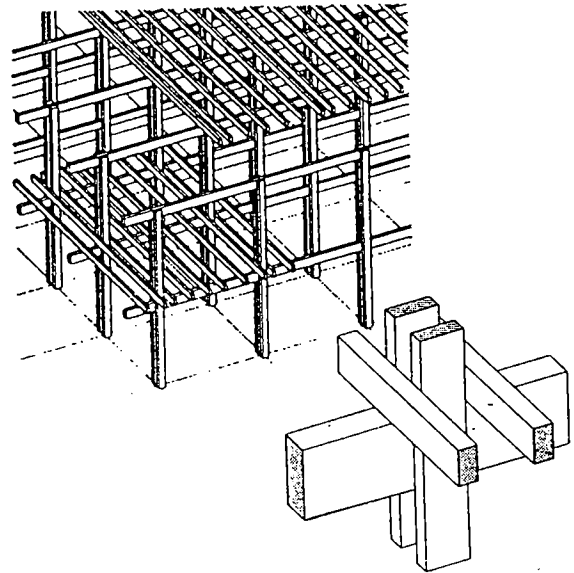
Jatkuvat palkit



Jatkuvat pilarit



Kaksiosaiset palkit

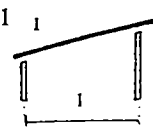
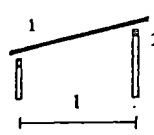
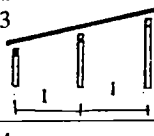
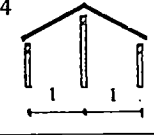
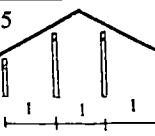


Kaksiosaiset pilarit

Kuva 3.1. Erilaisia pilari-palkki-järjestelmiä jaoteltuna pilarien ja palkkien keskinäisen sijainnin mukaan /6/.
 Figure 3.1. Some examples of post-beam structures /6/.

Taulukko 3.1. Järeän sahatavaran pilari-palkki-järjestelmät ja järeiden palkkien mitat, kun rakenteen omapaino $g = 0,5 \text{ kN/m}^2$ ja lumikuorma $= 1,8 \text{ kN/m}^2$. Sahatavara kuuluu lujuusluokkaan T30 ja kosteusluokkaan 2. Palkit on tuettu kiepahdusta vastaan yläpuolisella rakenteella. Rakennuksen seinäkorkeus voi olla 2,5...5 m. Sekundäärit ovat 0,6 m välein, ja niiden taipuma on rajattu arvoon $l/200$.

Table 3.1. Post and beam structurals systems with large size timber.

Tyyppi System	Katto- kaltevuus Roof angle [°]	Jänne 1 Span [m]	Keskinäinen etäisyys k cc [m]	Poikkileikkaus Cross section b/h [m ²]	Sekundäärit Second. b/h [m ²]	Taipuma Deflection	Puumenekki* Vol. of timber [m ³ / m ²]
1 	10...30	4,8 6,0 6,0	3,6 3,6 4,2	150×300 200×325 250×325	50×200 50×200 75×200	$l/151$	0,029 (0,017... 0,025)
2 	10...30	4,8 5,4 6,0 6,0	palkit beams 1,2 pilarit posts 3,6 palkit 1,2 pilarit 4,2	1. 125×200 2. 100×250 1. 125×225 2. 125×250 1. 125×250 2. 125×275 1. 125×250 2. 125×300	50×75	1. $l/130$ 2. $l/257$	0,042 (0,006)
3 	10...35	...6,0	palkit 1,2 pilarit ...4,2				
4 	10...35	...6,0	palkit 1,2 pilarit ...4,2				
5 	15...40	...6,0	palkit 1,2 pilarit ...4,2				

* Kantavat rakenteet, (sekundääripalkit).

* Load bearing structures

3.2 Kehärakenteet

Toiminnan vaatiessa paljon ovia, aukkoja ja vapaita tiloja käytetään kehärakennetta. Kehärakenteissa palkit liittyvät pilareihin jäykin liitoksiin, jolloin kehä kantaa tasonsa suuntaiset vaakavoimat. Kehissä voidaan käyttää kiilamaisia palkkeja ja pilareita, jolloin optimoidaan puun käyttö. Tällöin sijoitetaan palkin suurempi poikkileikkaus ja oksattomampi tyvipuu eniten rasitettuun kehänurkkaan. Kehärakenteet jaetaan rakenteeseen tulevien nivelien määrän perusteella kaksi- ja kolminivelkehiin. Kehä on kaksi- tai useampi-aukkoinen, jos keskellä on pystypilareita. Järeästä puusta tehdyllä kaksinivelkehällä päästään n. 8 m:n jänneväliin.

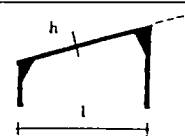
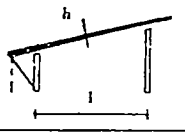
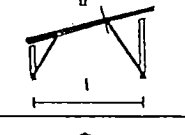
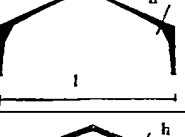

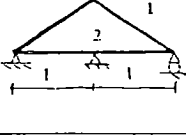
Kolminivelkehä on staattisesti määrätty rakenne, jolloin se sallii suuremmat valmistus- ja asennustoleranssit, eikä ole herkkä tukien liikkeille eikä liitosten liukumille. Niveleen kohdistuva vaakavoima voidaan johtaa perustuksiin tai heikoilla mailla kantaa erillisellä

vetotangolla. Yhdistetyssä kolminivelkehässä palkkien ja pilarien sekä vinotukien väliset liitokset tehdään nivelellisinä. Kehien jänneväli voi olla järeää puuta käytettäessä jopa 15 m.

Kehärakenteisiin kuuluu myös kolminivelkannate eli kolmioristikko. Järeästä sahatavaraa tehtävät kehät on esitetty taulukossa 3.2.

Taulukko 3.2. Järeää sahatavaraa käyttäen tehtäviä kehärakenteita ja järeän sahatavaran mitat, kun rakenteen omapaino $g = 0,5 \text{ kN/m}^2$, lumikuorma $q_1 = 1,8 \text{ kN/m}^2$ ja tuulikuorma $q_2 = 0,5 \text{ kN/m}^2$. Sahatavara kuuluu lujuusluokkaan T30 ja kosteusluokkaan 2. Rakennusten seinäkorkeus voi olla 2,5...5 m.

Table 3.2. Frames that are made of large size timber.

Tyyppi <i>System</i>	Käyttö <i>To use</i>	Kattokaltevuus <i>Roof angle</i> [°]	Jänne l <i>Span</i> [m]	Keskinäinen etäisyys k cc [m]	Poikkileikkaus <i>Cross section</i> h *
1 	Hallit, konevarastot, maatalouden tuotantotilat	10...30	...6,0	1,2...3,6	$\frac{l}{30} \cdots \frac{l}{20}$
2 	Hallit, konevarastot, maatalouden tuotantotilat	10...35	...7,2	2,4...3,6	$\frac{l}{26} \cdots \frac{l}{22}$ 2-kertainen palkki
3 	Hallit, varastot, maataloudentuotantotilat	10...35	...8,4	2,4...4,2	$\frac{l}{36} \cdots \frac{l}{32}$
4 	Hallit, rehuvarastot, maatalouden tuotantotilat	20...45	...12,0	1,2...2,4	$\frac{l}{36} \cdots \frac{l}{30}$ 2-kertainen palkki
5 	Hallit, rehuvarastot, maatalouden tuotantotilat	20...45	...12,0	2,4...4,2	$\frac{l}{36} \cdots \frac{l}{32}$
6 	Kattotuolit	15...	3,6...4,8	1,2	$\frac{l}{16} \cdots \frac{l}{14}$ $\frac{l}{24} \cdots \frac{l}{21}$

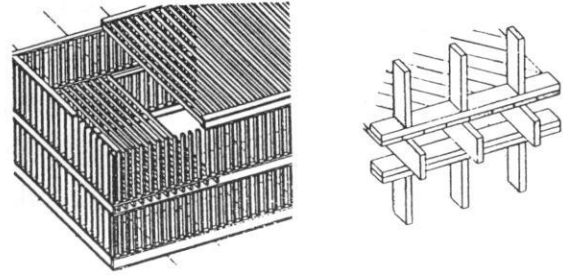
* Käytettävän järeän puutavaran leveys $b \geq 125 \text{ mm}$.

** Kantavat rakenteet, (sekundääripalkit).

3.3 Kantavat seinät -järjestelmä

Kantavat seinät -järjestelmä on yleinen asuinrakennusten rakennejärjestelmä. Kantavan pystyrakenteen muodostavat pääasiassa hirsii- tai soiroseinät. Yläpohjan kantavana rakenteena on yleensä ristikko, mikä voidaan korvata järeästä sahatavaraa tehdyllä kolmioristikolla tai pilari-palkki-rakenteella. Välipohjissa kantavana vaakarakenteena ovat puupalkit. Järjestelmät on esitetty taulukossa 3.3.

Järeää sahatavaraa käytettäessä voi soiroseinässä joka toinen runkotolppa olla leveämpi, jolloin saadaan jäykistyslevyille tukevampi naulausalusta. Käytettäessä järeää sahatavaraa lattiapalkeissa voidaan rakennus tehdä "platform"-järjestelmän mukaisesti kuvassa 3.2 esitettynä tapaan. Tällöin seinät rakennetaan kantavien vaakarakenteiden päälle, jolloin ala- ja välipohjapalkkien kuivumisen aiheuttamien korkeusmuodonmuutosten synnyttämät haitat vähenevät.



Kuva 3.2. "Platform"-rakenne /6/.
Figure 3.2. The platform framing /6/.

Taulukko 3.3. Kantavat seinät -järjestelmällä toteutettavia asuinrakennuksia ja järeiden puupalkkien mittoja, kun rakenteen omapaino $g = 0,5 \text{ kN/m}^2$, hyötykuorma $q_1 = 1,5 \text{ kN/m}^2$ ja lumikuorma $q_2 \approx 1,3 \dots 1,8 \text{ kN/m}^2$. Sahatavara kuuluu lujuusluokkaan T30 ja kosteusluokkaan 1. Ulkoseinät ovat kantavia.

Table 3.3. Examples of bearing wall -framing systems and dimensions of the structures. $g = 0,5$, $q_1 = 1,5 \text{ kN/m}^2$, $q_2 \approx 1,3 \dots 1,8 \text{ kN/m}^2$.

Tyyppi System	Huom.	Katto- kaltevuus Roof angle [°]	Jänne 1 Span [m]	Keskinäinen etäisyys k cc [m]	Poikkileikkaus Cross section b/h [m ²]	Puumenekki *) Vol. of timber [m ³ /m ²]
1 	Keskellä on kantava pilari-palkki-linja, joka voidaan tehdä myös kantavana seinänä.	25...	3,6...4,8	kattotuolit trusses 1,2 palkit beams 1,2 pilarit posts 3,6	1. 125×250... 125×300 2. 125×175... 125×225 3. 125×275... 150×325	0,117
2 	Keskellä on kantava pilari-palkki-linja, joka voidaan tehdä myös kantavana seinänä.	15...	3,6...4,8	palkit 0,9...1,2 pilarit 3,6	1. 100×175... 250×250 2. 100×175... 125×225 3. 125×250... 150×325	0,110
3 	Talon sisällä on 2 kantavaa pilari-palkki-linjaa, jotka voidaan tehdä myös kantavina seininä.	15...	9,6	palkit 0,9...1,2 pilarit 3,6	1. 100×175... 125×175 2. 100×175... 125×175 3. 125×250	0,095
4 	Talon sisällä on kantava pilari-palkki-linja, joka voidaan tehdä myös kantavana seinänä.	15...	3,6...4,8	kattotuolit 1,2 palkit 1,2 pilarit 3,6	1. 125×225... 125×300 2. 125×275... 150×325	0,100
5 	Talon sisällä on kantava pilari-palkki-linja, joka voidaan tehdä myös kantavana seinänä.	15...	3,6...4,8	kattotuolit 1,2 palkit 1,2 pilarit 3,6	1. 125×225... 125×275 2. 125×225... 125×275	0,091

*) Kantavat rakenteet.

*) Load bearing structures.

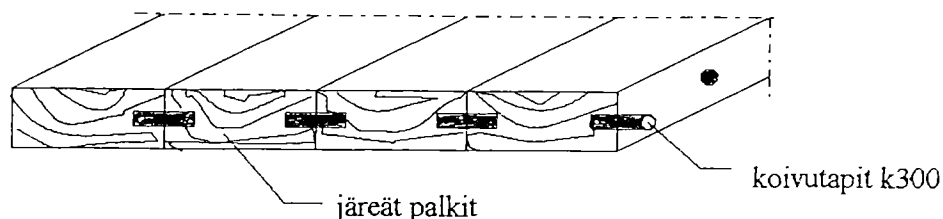
3.4 Laatta- ja arinarakenteet

Arina muodostuu perinteisesti kahdesta toisiaan risteävästä palkistosta. Palkit liitetään risteyskohdissa pultein tai vaarnoin. Arinarakenteissa palkiston ominaisuudet tasaantuvat, jolloin yksittäisten palkkien oksien ja halkeamien vaikutus rakenteen lujuuteen on vähäinen. Puisten arinoiden rakennekorkeus on suuri. Arinarakenteella voidaan kattaa noin 8 m pitkä tila ilman välitukia.

Massiivisella laattalla tarkoitetaan puupalkeista kuvan 3.3 mukaisesti tapittamalla valmistettua laattarakennetta. Puupalkit on tapitettava koivutappeja käyttäen toisiinsa vähintään 30 cm välein, jotta puun vääntyminen kuivuessa voidaan estää. Palkkien välit saumataan joustavalla materiaalilla, jotta puupalkeille jää riittävä tila kosteuselämiseen. Laatassa käytettävän puutavaran tulee olla mahdollisimman lähellä lopullista tasapainokosteuttaan. Sahatavaran kosteuspitoisuuden tulisi lämmitettävissä tiloissa olla korkeintaan 12 %.

Laatan taipumia voidaan vähentää tekemällä se jatkuvaksi. Massiivisen laatan omapaino on pieni ja palonkestävyys hyvä.

Massiivista laattaa voidaan käyttää asuinrakennusten välipohjana ja maanpainesienien vaakasuuntaiseen tukemiseen. Taulukossa 3.4 esitetyt laatat on mitoitettu olettaen, että kolme palkkia toimii yhdessä. 3.3.

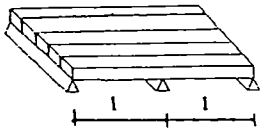
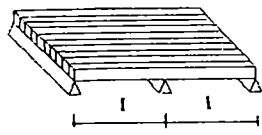


Kuva 3.3. Massiivinen laatta.

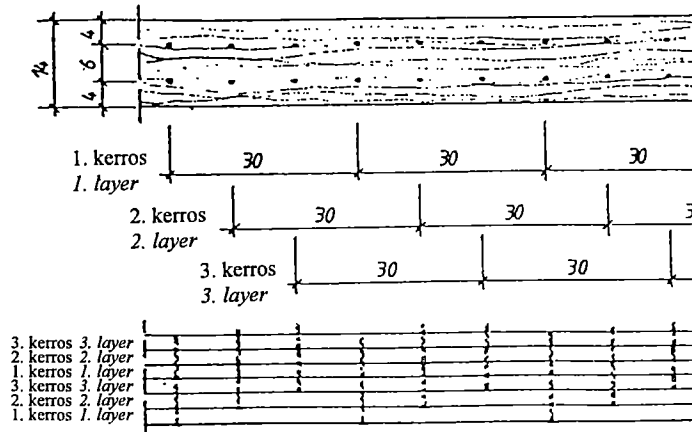
Figure 3.3. The plate made of large size timber.

Taulukko 3.4. Massiiviset puulaatat ja käytettävän sahatavaran koko, kun hyötykuorma $q = 1,5 \text{ kN/m}^2$. Laatan taipuma on rajattu arvoon $l/300$. Sahatavara kuuluu lujuusluokkaan T30 ja kosteusluokkaan 1. Mitoituksessa on oletettu, että kolme palkkia toimii yhdessä.

Table 3.4. The wood plates made of large size timber.

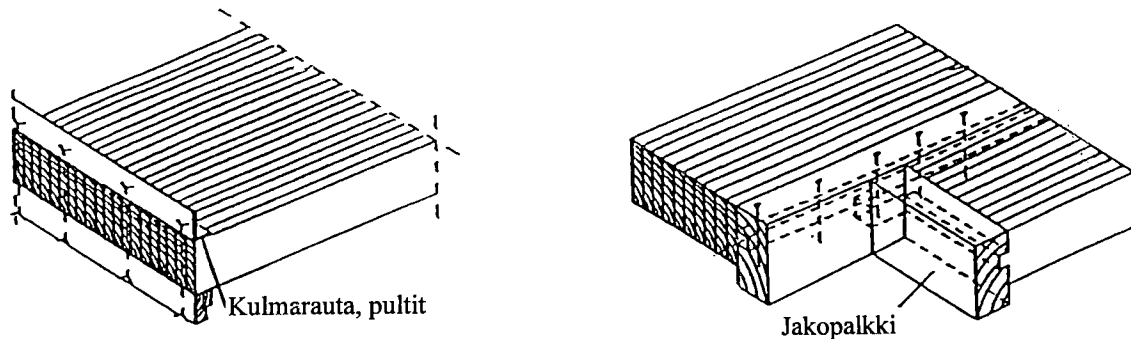
Tyyppi System	Käyttö To use	Jänne l Span [m]	Poikkileikkaus Cross section b/h [m ²]	Puumenekki Vol. of timber [m ³ /m ²]
1 	Asuinrakennukset	3,6...4,8	200×125... 150×150	0,15
2 	Asuinrakennukset, julkiset tilat	3,6...4,8	25×125... 75×150	0,15

Välipohja voidaan tehdä myös käyttäen syrjälankutusta, jolloin lankut naulataan syrjällään kiinni toisiinsa massiivisen laatan tapaan. Näin voidaan minimoida puun kuivuessa laattaan syntyvät raot ja yksittäisten lankkujen vääntyminen. Lankut naulataan yhteen kuvan 3.4 mukaisesti. Syrjälankkulaatan kuivuessa 12 % kosteudesta 9 % kosteuteen kutistuu laatta noin 7 mm/m. Kun tämä jakautuu kaikille nauiloille, ei laattaan muodostu näkyviä rakoja. Laattaan tehtävät aukot tehdään kuvan 3.5 mukaisesti.



Kuva 3.4. Syrjälankkulaatan naulaus /25/.

Figure 3.4. The nailing of a plate made of vertical planks.



Kuva 3.5. Syrjälankkulaatan aukotus /25/.

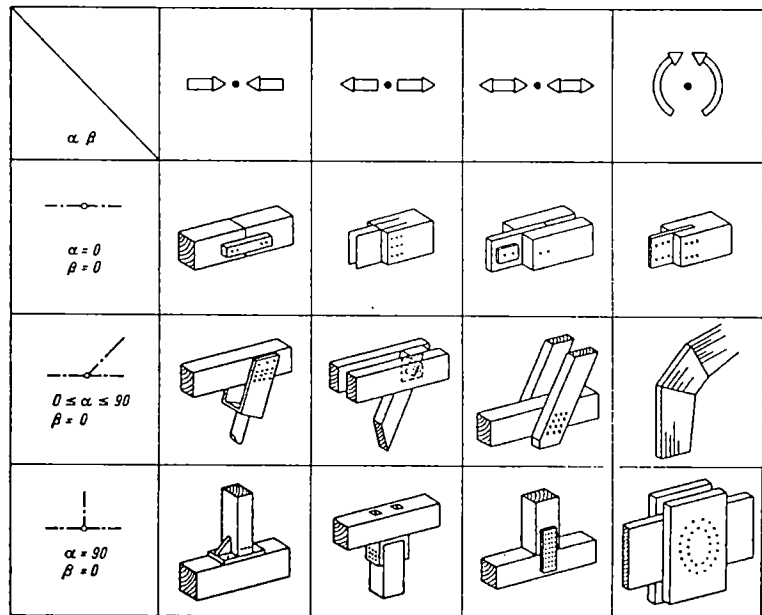
Figure 3.5. Openings in the plate made of vertical planks.

4 JÄREÄN PUUN LIITOKSET

Järeän puutavaran liitosten suunnittelussa tulisi kiinnittää erityistä huomiota puun kuivumisen aiheuttamaan kutistumiseen, puun epähomogeenisuuteen, tukipintojen riittävyteen ja puuhun tehtäviin loveuksiin. Liitoksen on kestettävä sille käytön aikana tulevat kuormat, asennuksen aiheuttamat rasitukset sekä lämpö- ja kosteusrasitukset. Keski-Euroopassa on käytössä useita erilaisia liitostekniikoita, joita Suomessa ei ole käytössä. Suomessa rakennuspuutavara on ollut poikkileikkaukseltaan pienempää kuin Keski-Euroopassa käytetty.

Liitokselle ja sen osille asetetaan vaatimuksia lujuuden, jäykkyyden, paloturvallisuuden, korroosionkeston, asennus- ja valmistustekniikan sekä esteettisyyden suhteen. Väliaikaisissa rakennelmissa oleville liitoksille sallitaan suuremmat siirtymät kuin pysyvissä, pitkäaikaisten kuormitusten alaisissa rakenteissa. Liitoksen korroosionkesto korostuu ulkoilmassa ja kosteissa sisätiloissa, kuten maatalouden tuotantorakennuksissa. Kantavien ja jäykistävien rakenteiden liitokset on tarvittaessa suojattava palolta. Rakenteen asennusnopeutta voidaan parantaa käyttämällä rakenteessa paljon samantyyppisiä liitoksia sekä suunnittelemalla jatkokset rakenteen vähiten rasitettuihin kohtiin, jolloin selvittää yksinkertaisilla liitoksilla. Liitettävien kappaleiden poikkileikkaus ei saa heikentyä liikaa liitoksen kohdalla. Heikennys saa yleensä olla enintään 20 % kappaleen poikkileikkausalasta.

Kuvassa 4.1 on esitetty liitoksia voimansiirtokyvyn mukaan jaoteltuna. Kantavien puurakenteiden liitokset jaetaan liima-, kontakti- ja mekaanisiin liitoksiin. Liimaliitos on erittäin jäykkä liitos, jonka valmistus on valvonnan alaista työtä ja valmistusolosuhteet tarkoin määriteltä. Suoraa kontaktia käyttäen voidaan puristusliitokset tehdä taloudellisesti. Mekaanisia liittimiä voidaan käyttää lähes kaikissa liitoksissa. Kontakti- ja mekaaniset liitokset, joihin tässä esityksessä keskitytään, soveltuvat hyvin tehtäviksi työmaaolosuhteissa.



Kuva 4.1. Erilaisia liitoksia jaoteltuna voimansiirtokyvyn ja liitettävien kappaleiden välisen kulman mukaan: puristusta, vetoa ja momenttia siirtävät liitokset /7/.

Figure 4.1. Different joints grouped with ability for force transmission and the angle of jointed sections /7/.

Metalliset liitoselimet on yleensä suojattava palolta. Paras ja usein taloudellisin tapa on sijoittaa liitoselimet järeään puuhun tehtyyn loveen siten, että ne ovat palonkestoajan puun hiiltymättömässä osassa. Liittimien päät jätetään puun sisään ja suojataan reikiin työnnettyillä puutapeilla. Liitososien suojaamiseen voidaan käyttää puuta, puupohjaisia levyjä, teräksen palonsuojaukseen tarkoitettuja levyjä tai palonsuojamaaleja. Teräsosan lämmitessä puun syttymispisteeseen alkaa puu liitososan ympäriltä hiiltä. Hiiltymisnopeus riippuu teräksen lämpötilasta ja teräsosan puun pintaan kohdistamasta kuormituksesta. Hiilen murtuessa sen lämmöneristyskyky häviää ja hiiltymisen nopeutuu. Taulukossa 4.1 on esitetty joidenkin metallisten liittimien avulla tehtyjen liitosten palonkestoajoja.

Taulukko 4.1. Liitosten palonkestoajoja /8/.
Table 4.1. Fire resistance times for joints /8/.

Liitin <i>Joint</i>	Palonkestoaja <i>Fire resistance time</i>	Yleistä <i>General</i>
Naulaliitos, suojaamaton <i>A nailed joint, unprotected</i>	10...20 min	
Pulttiliitos, suojaamaton <i>Bolted joint, unprotected</i>	10...20 min	Palonkestoaja riippuu puuosien paksuudesta. <i>Depends on the thickness of components</i>
Vaarnaliitos <i>A shear connector</i>	10...20 min	Toimii kuten pulttiliitos. Menettää lujuutensa pultin puristavan voiman hävittyä. <i>As a bolted joint.</i>
Naulauslevyliitos <i>Nail plate</i>	10 min	Naulan pituus ≥ 40 mm, puun paksuus ≥ 45 mm. <i>The length of the nail ≥ 40 mm, thickness of the wood ≥ 45 mm.</i>
Naulalevyliitos, suojaamaton <i>Nail plate unprotected</i>	0...10 min	

4.1 Mekaanisin liittimin tehdyt liitokset

Mekaanisia liittimiä ja liitososia ovat esimerkiksi naulat, naulalevyt, pultit, ruuvit, vaarnat, sinkilät sekä erilaiset metalliset liitososat ja vaneri-, pelti- sekä teräslevyt. Mekaaniset liitokset voidaan rakenteensa perusteella jakaa yksi-, kaksi- tai monileikkeisiin liitoksiin sen mukaan, kuinka monen saumapinnan kautta voimat siirtyvät. Järeissä puurakenteissa monileikkeiset liitokset ovat tehokkaita, sillä niissä liittimien kapasiteetti voidaan hyödyntää tehokkaammin. Tällöin myös mahdollisesti käytettävät liitoskappaleet saadaan pienemmiksi, materiaalikustannuksiltaan alhaisemmaksi ja liitosten mitoitus yksinkertaisemmaksi.

Kosteusvaihtelut alentavat kaikkien puun mekaanisten liitosten jäykkyyttä ja mahdollisesti lujuutta. Jos järeän puun kosteusmuodonmuutokset estetään lujalla ja jäykällä kiinnityksellä, halkeaa puu helposti. Kun käytetään metallisia liitoselimiä, jotka eivät seuraa puun kosteusmuodonmuutoksia, on liittimien väliset etäisyydet ja liitoskappaleiden leveys kohtisuoraan puun syysuuntaan nähden pidettävä pieninä tai tehtävä liitoskappaleessa olevat liittimien reiät soikeiksi liikemahdollisuuksien turvaamiseksi.

Puun pitkittäinen lämpölaajeneminen on pientä, eikä sitä tarvitse ottaa huomioon mitoituksessa. Mikäli käytetään suuria metallisia liittimiä, on puun ja metallin lämpölaajenemiseroista syntyvä, syitä vastaan kohtisuora jännitys otettava huomioon. Puun lämpölaajenemiskerroin on syiden suunnassa $4...5 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ja syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa $34...58 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, kun taas teräksen lämpölaajenemiskerroin on $12 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

Mekaaniset liittimet mitoitetaan plastisuusteoriaan pohjautuvan puikkoliitosteorian mukaan, jossa tarkastellaan jäykkäplastisen materiaalin ympäröimää jäykkäplastista puikkoa, jota kuormitetaan kohtisuoraan puikon akselia vastaan. Ympäröivän materiaalin jännitysten oletetaan olevan reunapuristuslujuuden suuruisia, kun siirtymiä alkaa tapahtua.

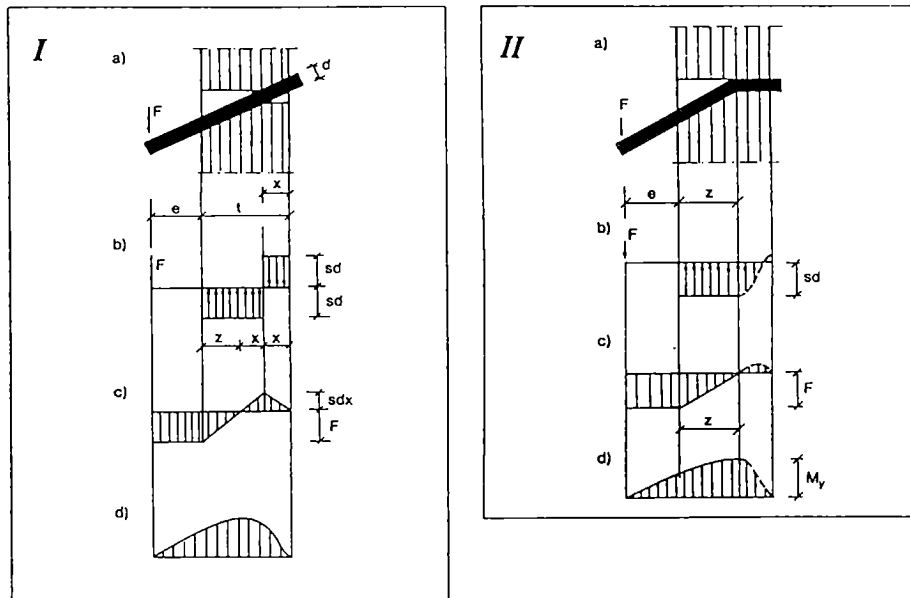
Kuvassa 4.1 on esitetty jäykän ja hoikan puikon toiminta. Puikkoliitosteoriolla ei voida arvioida liitoksen siirtymiä eikä puikon taipumisesta aiheutuvaa normaalivoiman liitoksen lujuutta kasvattavaa vaikutusta.

Puikkoliitos voi murtua joko puun reunapuristuslujuuden ylittyessä tai puikon myöädessä. Puikon myötömomenti M_y saadaan kaavasta (1)

$$M_y = f_y \cdot W_p \quad (1)$$

missä f_y = materiaalin myötölujuus

W_p = poikkileikkauksen plastinen taivutusvastus.



Kuva 4.1. I Jäykän ja II hoikan puikon toiminta. a) Siirtymät, kiertymäpiste kohdassa x , b) ulkoiset voimat, c) leikkausvoima ja d) taivutusmomentti /9/.

Figure 4.1. Functioning of (I) stiff and (II) flexible pin /9/.

Reunapuristuslujuudella s tarkoitetaan liittimen alla vaikuttavaa painetta, kun puu on murtunut tai siinä on tapahtunut tietyn suuruinen muodonmuutos (yleensä 3 mm). Reunapuristuslujuus on riippuvainen puun puristuslujuudesta, liittimen dimensioista, voiman ja syyn suunnan välisestä kulmasta, puun kosteudesta sekä voiman vaikutusajasta. Reunapuristuslujuus voidaan laskea Larssenin kaavalla 2, joka on tarkoitettu yli 6 mm paksuille liittimille. Puun reunapuristuslujuuden riippuvuus pyöreän puikon paksuudesta eri suuntakulmilla nähdään kuvasta 4.2.

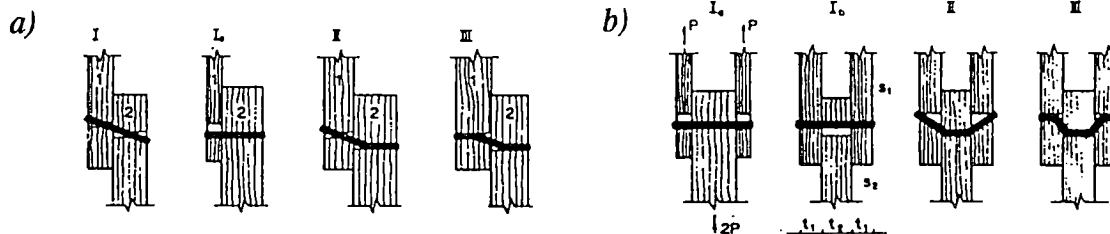
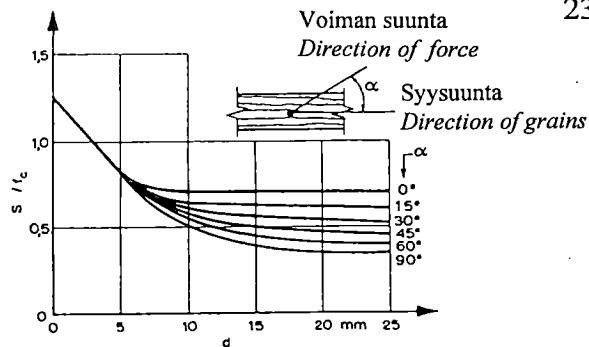
$$s_\alpha = s_{II} - (s_{II} - s_\perp) \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

kun puun puristuslujuudet ovat $s_{II} = 0,7 \cdot f_c$

$$s_\perp = 0,35 \cdot f_c .$$

Kuva 4.2. Puun reunapuristuslujuuden s riippuvuus pyöreän puikon paksuudesta eri suuntakulmilta. f_c on puun puristuslujuus syysuunnassa /10/.

Figure 4.2. The edge compression strength s as a function of the thickness of the pin and the angle of the force and the grain direction /10/.



Kuva 4.3. a) 1- sekä b) 2-leikkeisten liitoksien murtotavat /10/.

Figure 4.3. a) Failure mechanism of a) single shear and b) double shear /10/.

Yksileikkeisen ja kaksileikkeisen puikkoliitoksen murtomekanismit riippuvat liitoskappaleiden paksuuksista ja reunapuristuslujuuksista. Murtotavat on esitetty kuvassa 4.3.

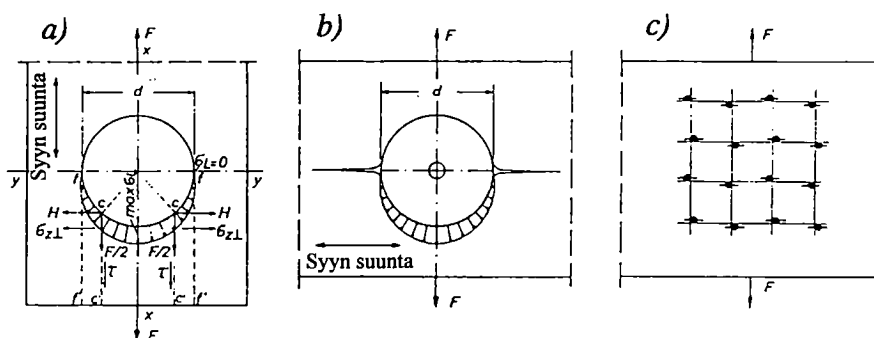
Voiman siirtyessä liittimeltä puulle syntyy puuhun reunapuristuksen vaikutuksesta elastisia ja plastisia muodonmuutoksia, joiden suuruus riippuu puun reunapuristuslujuudesta ja käytetystä liittimestä. Kun liitoksessa käytetään suorakulmaisia vaarvoja, jakautuu reunapuristus puussa lähes tasaisesti vaarnan koko pinta-alalle. Pyöreitä liittimiä käytettäessä oletetaan reunapuristuksen usein jakautuvan liittimen alla tasaisesti pinta-alalle $A_{c,l}$ (3)

$$A_{c,l} = d_l \cdot d_p \quad (3)$$

missä d_l = liittimen halkaisija
 d_p = puun leveys tai liittimen pituus puussa.

Todellisuudessa reunapuristus vaikuttaa puuhun pyöreitä liittimiä käytettäessä kaikissa pisteissä liittimen poikkileikkauksen säteen suunnassa. Reunapuristuksen suuruus riippuu kuorman vaikutussuunnasta siten, että voiman suunnassa reunapuristus on suurimmillaan ja kohtisuorassa sitä vastaan lähes nolla. Koska puun poikittainen vetolujuus on pieni, voi kuvan 4.4 a) mukainen vaakasuuntainen voimakomponentti H aiheuttaa puuhun jännityksen, joka synnyttää puuhun halkeaman ja pienentää näin puun lujuutta liitosalueella. Syiden suuntainen voimakomponentti aiheuttaa puuhun leikkausjännityksen.

Kokeellisesti on todettu, että pieniä liittimiä käytettäessä syntyvä vaakavoimakomponentti H on pienempi kuin käytettäessä suuria liittimiä, minkä takia usein on tarkoituksenmukaista käyttää useita pienempiä liittimiä muutaman suuren sijasta. Mikäli liitokseen vaikuttaa voima kohtisuorassa puun syitä vastaan, murtuu puu poikittaisen vetolujuuden ylittyessä liitoksessa. Tällöin puuhun syntyy syiden suuntainen halkeama kuvan 4.4 mukaisesti. Kuvan 4.4 c) mukaisessa liitoksessa yhdelle liittimelle tuleva voima on pieni, jolloin halkeilu on vähäisempää.



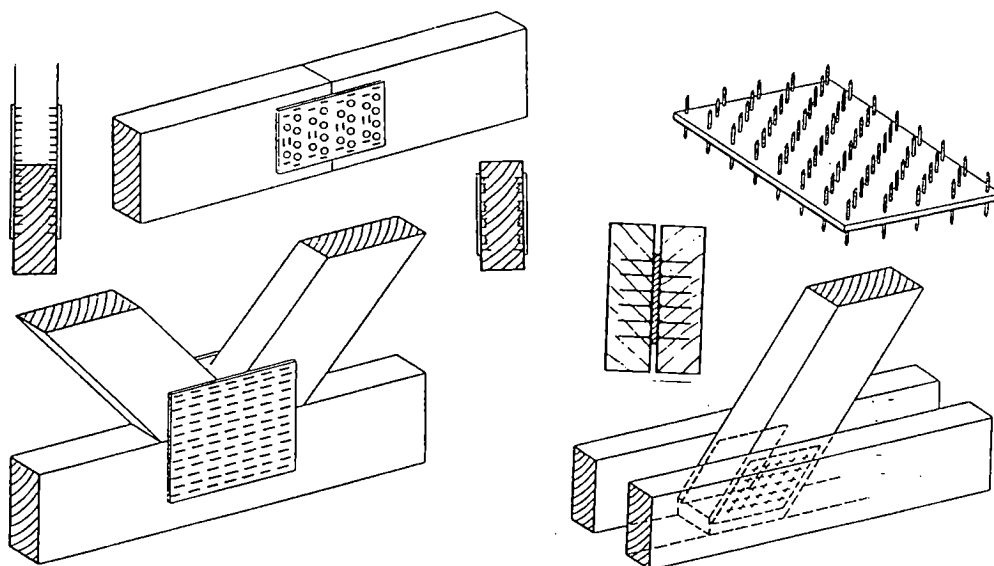
Kuva 4.4. Sylinterin muotoisen liittimen alle syntyvä puristusjännitys, kun a) voima vaikuttaa puun syiden suunnassa, b) voima vaikuttaa puun syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa, c) kuten b) -kohta, mutta liittiminä on käytetty nauloja /11/.

Figure 4.4. The compression stress caused by cylinder connector /11/.

Kun käytetään useita liittimiä jonossa kuorman vaikutussuunnassa, jakautuu kuorma liittimille epätasaisesti. Kuormien jakautuminen yksittäisille liittimille riippuu liitoksessa olevien osien jäykkyyksistä, liittimien sijoittelusta, liittimien määrästä ja yksittäisen liittimen kuorma-siirtymä-käyttäytymisestä. Reunimmaisset liittimet kantavat suurimman osan kuormista.

4.1.1 Naulalevyliitokset

Naula- ja piikkilevyjä voidaan käyttää järeän puun liitoksissa, kun liitettävä puu on lähellä lopullisen käyttötilansa tasapainokosteutta. Kuvassa 4.5 on esitetty erilaisia naula- ja piikkilevyliitoksia. Järeän puun vääntyminen kuivuessaan heikentää liitoksien lujuutta lyhyiden naulojen vääntyessä irti puusta liitospinnan lähistöltä. Kun lisäksi siirrettävät voimat ovat yleensä suuria, rajoittuu naulalevyjen käyttö järeän sahatavaran yhteydessä puristusliitosten varmistamiseen ja liitosalueiden vahvistamiseen. Naulalevyt estävät puun halkeilua sen kuivuessa ja kutistuessa sekä tasaavat tästä johtuvia sisäisiä jännityksiä.



Kuva 4.5. Naulalevy- ja piikkilevyliitoksia.
Figure 4.5. Nail plate joints.

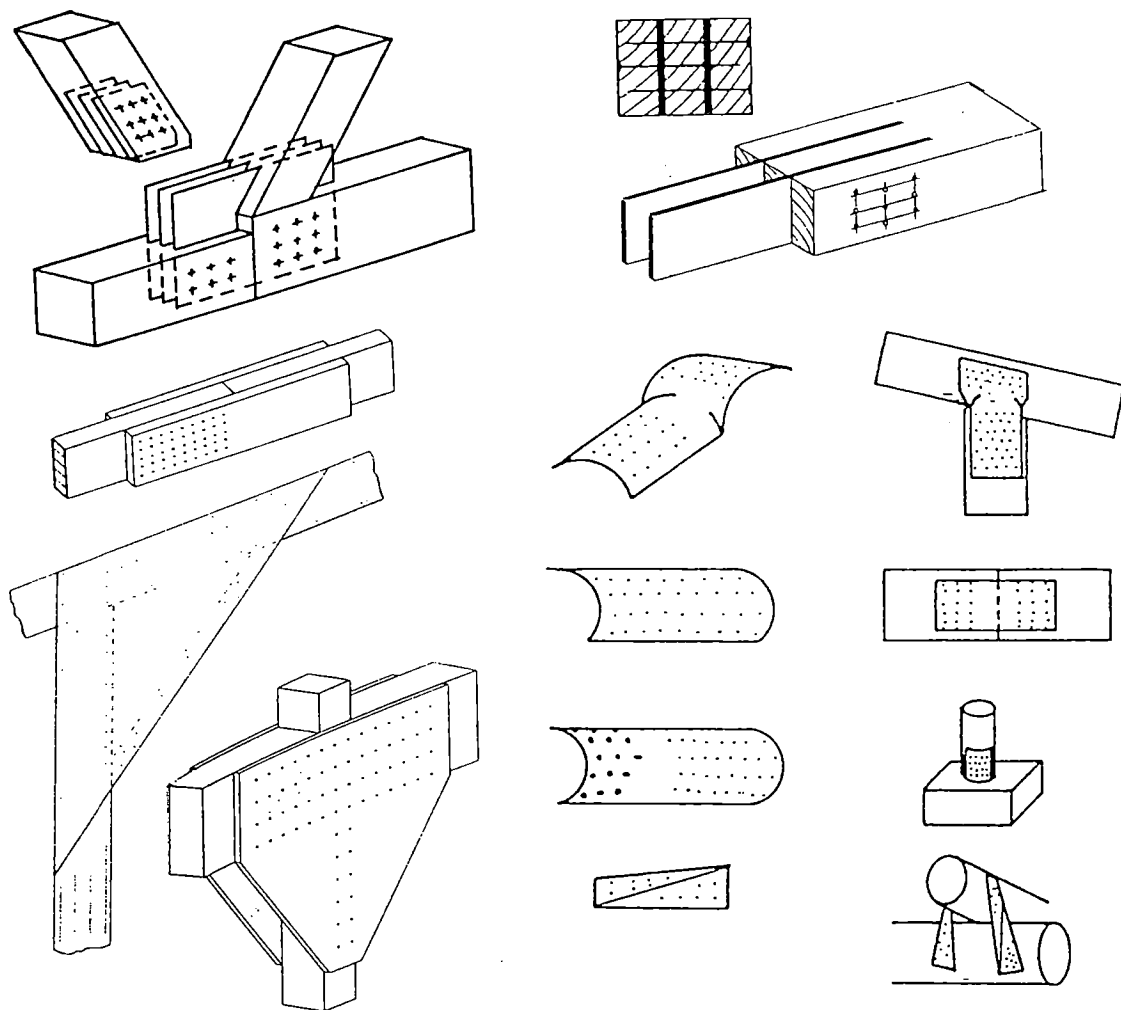
Naulalevyjä voidaan käyttää halkeilleen puun ja pulttiliitosten vahvistuksessa. Pulttiliitoksia vahvistettaessa naulalevy puristetaan liitosalueelle, ja sen läpi porataan pultille reikä. Piikkilevy soveltuu järeän puun liitoksiin naulalevyä paremmin, koska sillä voidaan siirtää suurempia voimia. Piikkilevyyn kuuluu noin 10 mm paksu teräslevy, johon hitsataan kartiopäiset naulat kiinni. Piikkilevyn puristamiseen tarvittava voima on suurempi kuin naulalevyjä puristettaessa, sillä käytettävät naulat ovat 40 mm pitkiä. Levy sijoitetaan yleensä liitettävien osien väliin, jolloin liitoksen palonkesto ja ulkonäkö on normaalia puun pintaan tehtyä liitosta parempi. Piikkilevyä mitoitettaessa voidaan voiman olettaa jakautuvan tasan kaikille liittimille, sillä jäykkä teräslevy tasoittaa myötäviin puikkoihin kohdistuvat voimat. Piikkilevyjen kyky vastustaa järeän puun vääntymistä riippuu naulojen määrästä ja tartuntalujuudesta sekä teräslevyn paksuudesta. Järeän puun kosteusmuodonmuutokset eivät yleensä aiheuta ongelmia, sillä piikkilevyn naulat tasaavat syntyvät jännitykset suuremmalle alalle. Piikkilevyjä voidaan käyttää järeästä sahatavarasta tehdyissä kehänurkissa, palkin jatkoksissa ja pilari-palkki-liitoksissa.

4.1.2 Naula- ja naulauslevyliitokset

Naulat ovat yleisin puun liitoksissa käytetty liitintyyppi. Liitoksen lujuus riippuu käytetystä puutavarasta, nauloista ja ympäristöolosuhteista. Naulauslevyliitokset tehdään naulaamalla pelti-, teräs- tai vanerilevyt liitettävien kappaleiden ympärille tai sisälle, jolloin liitos saadaan monileikkeiseksi. Naulauslevyjen avulla voidaan tehdä myös jäykkä liitos. Naulauslevyt saattavat estää järeän puun kosteusmuodonmuutoksia, jolloin liitettävät kappaleet halkeilevat. Liitoksessa olevat naulat jakavat halkeilun kuitenkin tasaisemmin puuhun. Naulauslevyliitoksen palonkesto on hyvä, mikäli metalliset naulauslevyt sijoitetaan puuhun tehtyihin sahauksiin tai käytetään vaneria naulauslevynä. Kuvassa 4.6 on esitetty erilaisia naulauslevyliitoksia.

Naulauslevyt voivat olla peltiä tai ohutta terästä ($t < 2$ mm), jolloin naulat lyödään niiden läpi ilman reikien esiporausta. Molempia materiaaleja käytetään monileikkeisissä liitoksissa, jolloin puuhun tehtyihin loviin sijoitetaan levyt, jotka naulataan puun pinnasta normaalisti. Levyjä varten tehtävät sahaukset saavat olla enintään 1 mm:n levyjä paksummat, ja levyt voidaan sijoittaa vähintään 20 mm:n etäisyydelle puun ulkoreunoista ja toisistaan. Tehtäessä naulauslevyliitos säälle alttiina olevaan rakenteeseen huonontavat sahausurat rakenteen pitkäaikaiskestävyyttä, sillä vesi pääsee kerääntymään niihin.

Ohuita metallilevyjä käytettäessä liitoksella voidaan saavuttaa suurikin kuormien siirtokyky, ja sen palonkestävyys on hyvä metallisten liitososien ollessa puun sisällä suojassa. Toinen naulauslevymalli on paksummasta teräksestä tehty esiporattu levy. Tällainen levy voidaan sijoittaa joko puuhun tehtyyn sahaukseen tai puun pintaan. Puun pintaan sijoitettu metallilevy on palotilanteessa huono ja korroosioaltis, mutta naulaaminen on helppoa. Kun naulauslevyliitoksessa käytetään puun pintaan asennettuja esiporattuja metallilevyjä, on naulojen päiden oltava kartiomaisia, jotta liitos saadaan tiukaksi.



Kuva 4.6. Erilaisia naulauslevyliitoksia
Figure 4.6. Connection plates.

Keski-Euroopassa ja Ruotsissa käytetään runsaasti vaneria naulauslevynä. Vanerin etuna muihin puutuotteisiin nähden on pienet kosteusmuodonmuutokset ristikkäisistä viilukerrokista johtuen. Vanerin pituussuuntaiseksi kosteusmuodonmuutokseksi voidaan yleensä olettaa enintään 1 mm/m, kun paksuussuunnassa levyn muodonmuutos on noin 5 % kosteuden kasvaessa 5 prosentista 15 prosenttiin. Vanerilevyt naulataan yleensä liitettävien kappaleiden sivuille, mutta ne voidaan myös sijoittaa liitettäviin kappaleisiin tehtyihin sahausuriin. Liitosta ei yleensä voi tehdä monileikkeiseksi vanerin paksuudesta johtuen. Vaneria voidaan käyttää liitosalueen vahvistamiseen, sillä sen reunapuristuslujuus on suurempi kuin puun, sekä halkeilleen puun vahvistamiseen.

Naulauslevyjen yhteydessä käytettävät naulat ovat yleensä teräväkärkisiä, pyöreitä nautoja, joiden paksuus on 2,5...4 mm. Naulan lujuudesta riippuen voidaan tavallisesti yhdellä naulalla lävistää korkeintaan kolme pelti- tai ohutta teräslevyä. Käytettäessä naulauslevynä puun sisään asennettuja metallilevyjä on naulaus tehtävä huolellisesti, jotta naulat saadaan lyödyksi vääntymättöminä levyjen läpi. Mikäli käytettävien nautojen paksuus on yli 4...6 mm, tulee niille porata 0,5...0,8 mm naulan paksuutta pienemmät reiät.

Tällöin puun halkeamisvaara naulaa lyötäessä vähenee, ja naulojen keskinäisiä etäisyyksiä voidaan pienentää noin 30 %. (Naulojen vähimmäisetäisyydet on esitetty SRakMK:n osassa B10.) Teräshevyn ja puun naulaliitoksessa voidaan naulojen keskinäisiä etäisyyksiä pienentää 30 %, sekä vanerin ja puun liitoksessa vastaavasti 20 %.

Puun kuivuminen ei vaikuta naulojen leikkauslujuuteen. Järeän puun kuivuessa syntyy liitettävien kappaleiden väliin kuitenkin rako, joka pienentää liitoksen lujuutta ja jäykkyyttä. Ristikkinä naulattuihin puihin syntyy lisäksi liitoksen lujuutta pienentäviä halkeamia, minkä takia naulaus on pyrittävä tekemään siinä kosteustilassa, johon liitoksen oletetaan joutuvan kuormitettuna. Jos rakenteen kosteus vaihtelee, on liitos syytä sijoittaa siten, että se voidaan tarkistaa ja tarvittaessa vahvistaa. Naulat voidaan mitoittaa puikkoliitosteorian mukaan, mutta niiden ominaisleikkauslujuuksia on esitetty myös kirjallisuudessa taulukon 4.1 mukaisesti /12/.

Taulukko 4.1. Nelikulmaisten lankanaulojen ominaisleikkauslujuuksia. Kuorman aikaluokassa A kerrotaan arvot 0,7:llä ja aikaluokassa C 1,7:llä. Käytettäessä profiloimattomia pyöreitä nauloja kerrotaan taulukon arvot 0,8:lla /12/.

Table 4.1. The characteristic nail loads for quadrangular nails according to /12/.

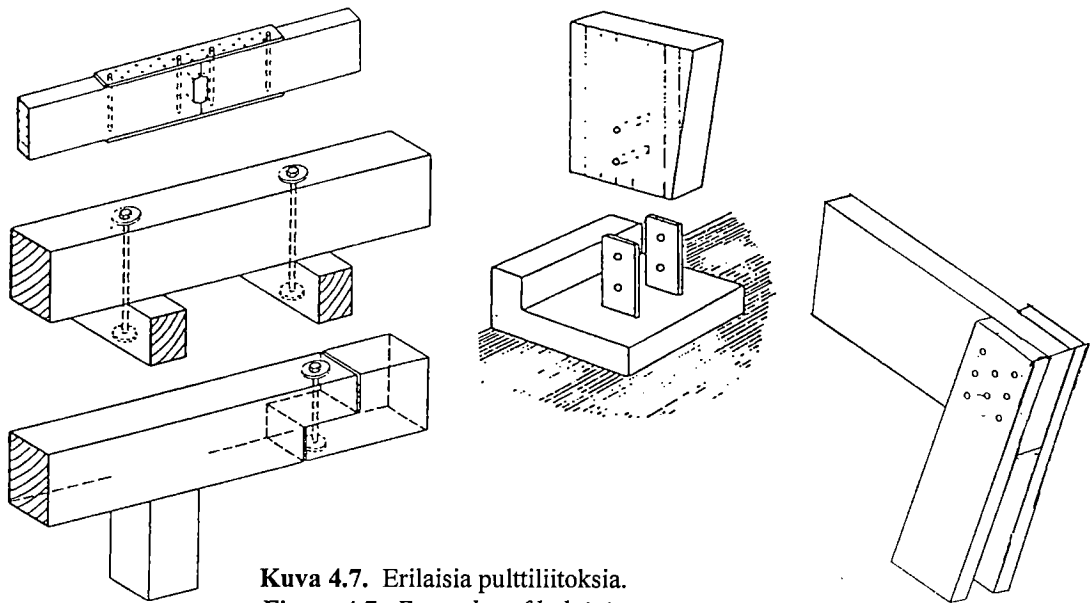
Naula Nail		Ominaisleikkauslujuus [N] Characteristic shear strength		
Paksuus Thickness d (mm)	Pituus Length L (mm)	Kosteusluokat Moisture class 1 ja 2	Kosteusluokka Moisture class 3	Kosteusluokka Moisture class 4
3,4	100	1000	880	680
4,2	125	1430	1260	970
5,1	150	1990	1750	1360
5,5	175	2270	2000	1540
6,0	225	2630	2310	1790
6,5	250	3010	2650	2050

Järeiden puurakenteiden liitokset siirtävät suuria voimia, jolloin naulojen määrä ja liitoksen koko kasvavat. Esiporaamalla naulojen reiät voidaan naulat sijoittaa lähemmäksi toisiaan, jolloin liitoksen koko pienenee. Järeän puun liitoksissa naulojen pituus on yleensä suurempi kuin normaalia sahatavaraa liitettäessä, jolloin naulauslevyliitosten teko käsin naulaamalla on raskas työvaihe. Nykyiset paineilmanaulaimet antavat mahdollisuuden naulata jopa 160 mm pitkiä nauloja. Näiden erityisnaulojen ominaisuudet vastaavat tavallisten naulojen ominaisuuksia.

4.1.3 Pulttiliitokset

Pulttiliitokset soveltuvat hyvin järeiden puurakenteiden liitoksiksi, jos liitosten jäykkyydelle ei aseteta vaatimuksia. Pultti asennetaan halkaisijaansa korkeintaan 1 mm:n suurempaan reikään. Liitos kiristetään mutterin avulla. Mutterin ja pultin kannan alla käytetään aluslevyä. Pulttiliitoksen siirtymät ovat suuret johtuen pultin reiän alkuväljyydestä sekä liitettävien kappaleiden kuivumiskutistumisesta. Pultin siirtymä ilman ulkopuolista

kuormitusta saattaa näin olla 0,5...1 mm. Suurten muodonmuutosten takia pultteja ja ruuveja ei yleensä käytetä yksin pysyvien rakenteiden liitoksissa, vaan liitosten jäykkyyttä parannetaan vaarujen tai metallisten liitoselimien avulla. Pulttiliitoksen palonkesto aika riippuu puuosien paksuudesta siten, että 185 mm leveä liimapuu alkaa hiiltä pultin ympäriltä noin 15...20 minuutin kuluttua palon alkamisesta, kun normaali sahatavara hiiltä jo muutaman minuutin kuluttua /10/. Pulttiliitoksen ulkonäkö riippuu käytettyjen aluslevyjen muodosta sekä pulttien sijoittelusta. Järeää puuta käytettäessä pulttiliitoksilla voidaan tehdä kehänurkkien liitokset ja pilari-palkki-liitokset, palkkien jatkokset kuvan 4.7 mukaisesti.



Kuva 4.7. Erilaisia pulttiliitoksia.
Figure 4.7. Examples of bolt joints.

Kun pultit sijoitetaan vierekkäin puun syysuuntaan nähden kohtisuorassa suunnassa, tulee välttää tarpeettoman suuria pulttien etäisyyksiä. Tämä korostuu käytettäessä liitoksessa teräslevyjä, jotka estävät järeän puun kosteusmuodonmuutokset. Koska pulttiliitoksissa pulttien määrä on yleensä vähäinen, kasvavat puun kutistumisesta ja vääntymisestä johtuvat jännitykset liittimien kohdalla suuriksi, jolloin poikittaisen vetojännityksen ylittäessä puun lujuuden seurauksena on yleensä yksittäinen suuri halkeama. Tällöin liitoksen lujuus alenee ja siirtymät kasvavat. Pulttiliitokset tulee suunnitella siten, ettei puu kutistuttuaan irtoa tuelta ja jää "roikkumaan" liittimien varaan. Liitettävien puiden kuivuttua tulee olla mahdollista kiristää pulttiliitoksia myöhemmin.

Pulttien lujuus määräytyy pultin materiaalin, lämpökäsittelyn ja valmistustavan mukaan. Pulttien hinta riippuu puolestaan materiaalista, pinnoituksesta, lujuusluokasta ja koosta. Kantavien rakenteiden liitoksissa käytettävien pulttien tulee olla halkaisijaltaan vähintään 12 mm, ja yleensä tulee käyttää vähintään kahta pulttia. Pulttien yhteydessä käytettävien aluslevyjen on oltava vähintään 0,3d paksuja ja halkaisijaltaan vähintään 3d, missä d on pultin halkaisija. Aluslevy mitoitetään alla olevan puun leimapuristuslujuuden perusteella. Alle 5 mm paksua aluslevyä ei saa käyttää.

Sekä puun että pultin laatu vaikuttaa pulttiliitoksen lujuuteen. Liitoksen lujuuteen vaikuttaa myös liitettävien osien paksuus, erityisesti liitososien ja liitettävien kappaleiden paksuuksien suhde. Järeän puun pulttiliitokset kannattaa yleensä tehdä monileikkeisiksi, jolloin pulttien kapasiteetti voidaan hyödyntää paremmin. Pultteja varten tehtävät reiät heikentävät liitettävien kappaleiden poikkileikkausta, jolloin pultteja ei voida sijoittaa useaan vierekkäiseen riviin. Syiden suuntaisen voiman vaikuttaessa liitokseen tulisi kriittisessä poikkileikkauksessa jäljellä olevan puun poikkileikkausalan olla vähintään 80 % alkuperäisestä. Mikäli pulttien avulla siirretään suuria voimia, lisääntyy pulttien määrä, ja liitokset saattavat muodostua määrääväksi tekijäksi myös liitettäviä kappaleita mitoitettaessa. Pulttien minimietäisyydet toisistaan ja puun reunoista on esitetty RakMK:n osassa B10.

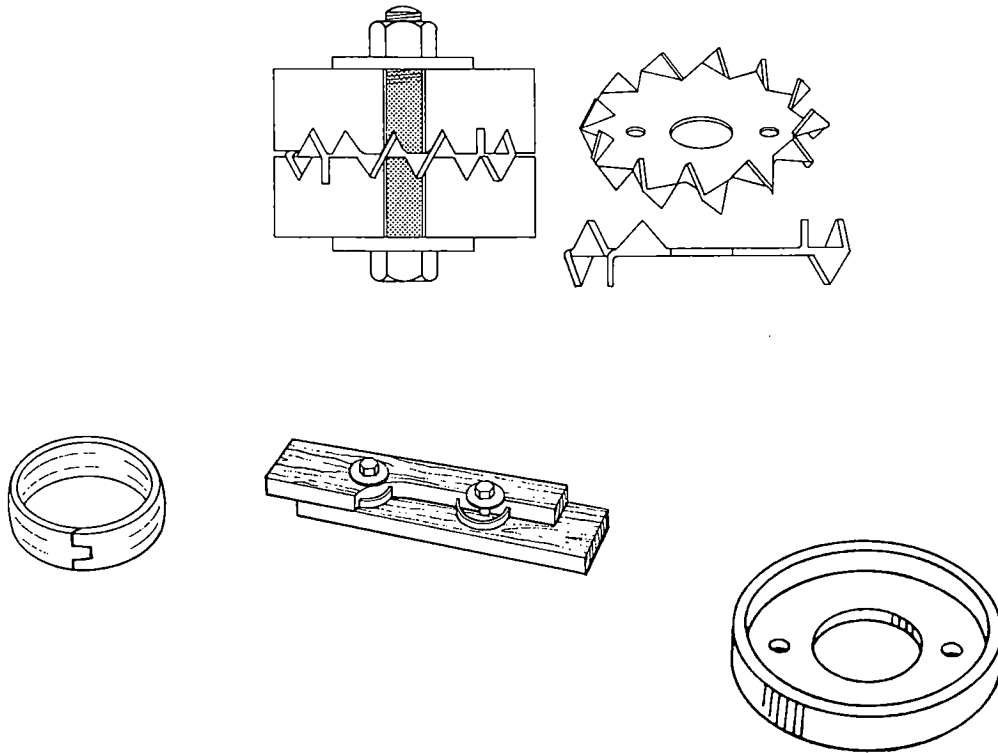
Pultin reiän reunapuristuslujuus riippuu pultin reiän koosta ja laadusta. Yli 1 mm väljä pultin reikä aiheuttaa epätasaisen reunapuristuksen pultin alla, ja pultin halkaisijaa pienempi reikä aiheuttaa puun halkeilua pulttia asennettaessa. Yleensä pultin reikä tulee tehdä ilman tarpeetonta väljyyttä.

Pulttiliitokset mitoitetaan puikkoliitosteorian mukaan. Laskettuun lujuuteen verrattuna kestää järeiden puurakenteiden pulttiliitos selvästi enemmän, mutta liukumat kasvavat tällöin niin suuriksi, että normaalitapauksissa liitoksen kapasiteettia ei voida täysin hyödyntää. Pulttiliitos voidaan mitoitaa myös RakMK:n osan B10 mukaisesti. Kosteus- ja aikaluokan vaikutus otetaan huomioon erillisillä korjauskertoimilla. Mikäli pulttiliitoksessa käytetään teräksisiä liitososia, kasvaa liitoksen lujuus syiden suunnassa 25 % ja liitoksen siirtymät pienenevät. Voiman vaikuttaessa syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa ei liitoksen lujuus muutu. Jos pulttiliitokseen kohdistuu myös pultin suuntaista normaali-voimaa, pultti mitoitetaan teräsrakenneosana.

Järeiden puurakenteiden liitoksissa voidaan käyttää myös ruuveja. Ruuvien etuna nauloihin nähden on, että ruuvit voidaan kiristää puun kuivuttua. Ruuvit voivat olla itseporautuvia tai esiporattuun reikään asennettavia. Esiporatun ruuvin reiän tulee olla noin 20 % pienempi kuin ruuvin kierteettömän osan halkaisija. Ruuviliitosten suunnittelussa käytetään pulttien mitoitushjeita. Ruuvien tartuntalujuus riippuu puun tiheydestä, asennussyvyydestä ja ruuvin halkaisijasta. Ruuveja ei tulisi käyttää puun päässä syiden suunnassa.

4.1.4 Vaarnaliitokset

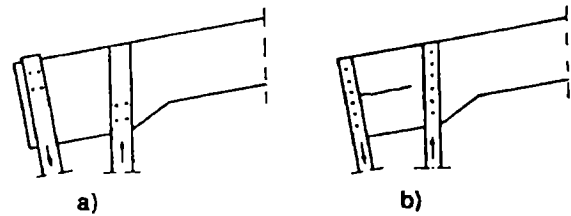
Vaarnaliitokset sopivat hyvin järeiden puurakenteiden liitoksiin, sillä niiden alkusiirtymät jäävät pienemmiksi kuin pulttiliitoksien. Vaarnaliitos on perinteinen liitos, jonka käyttö Suomessa on nykyään vähäistä, vaikka Keski-Euroopassa on vielä käytössä useita erilaisia vaarnatyyppejä. Vaarnat voivat olla joko puuhun puristettavia tai valmiiseen uraan tai kooloon asennettavia. Vanhimmat ja yksinkertaisimmat vaarnatyypit ovat porattuun reikään asennettava tappivaarna ja suorakaidevaarna. Näiden lisäksi on viime vuosisadalta alkaen kehitetty useita erilaisia vaarnatyyppejä, joista nykyään yleisimmin käytettyjä ovat rengas-, lautas- ja hammasvaarnat. Kuvassa 4.8 on esitetty erilaisia vaarnoja.



Kuva 4.8. Erilaisia vaarnatyyppejä.
Figure 4.8. Examples of shear connectors.

Ennen vaarnaliitoksen valmistusta liitettävät kappaleet tulisi tasapainottaa mahdollisimman lähelle lopullisen käyttötilansa kosteutta. Mikäli vaarnaliitoksia joudutaan tekemään kosteaan puuhun, on liitosten jatkuva tarkkailu ja ylläpito tärkeää siihen asti, kunnes puu on saavuttanut tasapainokosteuden ympäristönsä kanssa, tavallisesti ensimmäisen vuoden ajan. Kutistumisen seurauksena liitos pyrkii aukeamaan, jolloin liitoksen ylläpidolla tarkoitetaan liitettävien kappaleiden halkeamien tarkistamista ja sidepulttien kiristämistä tarvittaessa. Käytännössä tämä merkitsee myös sitä, että liitoksen kiristämismahdollisuus on järjestettävä rakenteellisesti.

Järeissä puurakenteissa tulee välttää liitoksia, joissa reunimmaisten vaarnojen etäisyys kohtisuoraan puun syysuuntaan nähden on suuri. Puu halkeaa helposti kuvan 4.9 mukaisesti, mikäli sen kosteusmuodonmuutokset estetään. Koska järeä sahatavara pyrkii vääntymään kuivuesaan, syntyy sidepultteihin vetojännitys niiden estäessä liitettyjen puiden vääntymisen irti toisistaan.

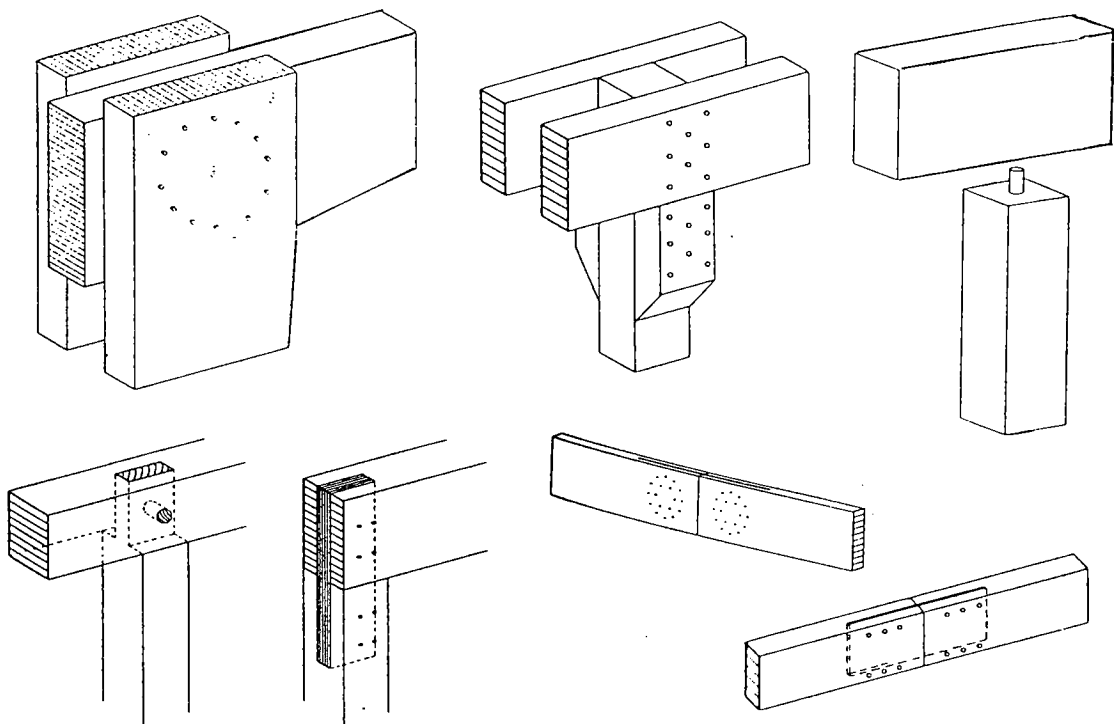


Kuva 4.9. Vaarnaliitoksin koottu kehänurkka: a) oikea ratkaisu ja b) virheellinen ratkaisu /9/.

Figure 4.9. A frame corner which is jointed with shear connector: a) a right solution b) wrong solution /9/.

4.1.4.1 Tappivaarnaliitokset

Tappivaarnaliitoksessa leikkausvoima siirretään kappaleiden välillä pyöreän puikon välityksellä. Perinnerakentamisessa käytetyt tapit tehtiin puusta, Suomessa yleensä koivusta. Nykyään tappivaarnat tehdään teräksestä. Tapit asennetaan lyömällä ne halkaisijaansa noin 0,2...0,5 mm pienempään reikään. Tappivaarnat pyöristetään päistään, jotta niitä asennettaessa liitettävä puu ei rikkoudu asennusreiän ympäriltä. Sidepultit estävät järeän puun kosteusmuodonmuutosten, kutistumisen ja vääntymisen, aiheuttaman liitoksen aukeamisen. Tappivaarnojen minimietäisyyksille puun reunoista ja toisistaan pätevät pulteille asetetut ehdot. Järeissä puurakenteissa tappivaarnoilla saadaan kaunis, taloudellinen, luja, jäykkä ja paloteknisesti toimiva liitos. Tappivaarnaliitoksia voidaan käyttää kehänurkissa, pilari-palkki-liitoksissa ja palkkien jatkoksissa kuvan 4.10 mukaisesti.



Kuva 4.10. Erilaisia tappivaarnaliitoksia.
Figure 4.10. Examples of dowel shear connectors.

Puisten tappivaarnojen halkaisija on 20...40 mm. Yleensä tappeihin käytettävä puu on uuni-kuivaa puuta, jolloin tapit imevät rakenteessa kosteutta päästäkseen tasapainokosteuteen muun rakenteen kanssa ja turpoavat. Tällöin liitos kiristyy. Puisten tappivaarnojen lujuus riippuu niiden tekotavasta. Tappivaarnat tulee sahata tai lohkaista suoraan syiden suunnassa niin, että syyt säilyvät ehjinä. Tapit voivat olla pyöreitä, suorakaiteen muotoisia tai monikulmioita, mutta jäykin liitos saadaan suorakaiteen muotoisilla tapeilla, jotka liitettävään kappaleeseen lyödessä painuvat nurkistaan. Suorakaiteen muotoiset tapit asennetaan pitkä sivu puun pituussuuntaan. Tällöin tappien liitettäviin puihin aiheuttama reunapuristus

keskittyy syiden suuntaan, ja liitoksessa usein mitoittavaksi tuleva syitä vastaan kohtisuora veto jää pieneksi. Puisia tappeja käytetään hirsirakentamisessa, huonekaluteollisuudessa ja esimerkiksi massiivisessa laatassa palkkien välisenä liitoksena.

Terästappeina käytetään sileää tai uritettua pyörötankoa (Fe37), jonka paksuus on yleensä 8...30 mm. Terästappien käyttö on hyvin yleistä Keski-Euroopassa järeiden puurakenteiden liitoksissa. Tappeja käyttämällä voidaan tehdä esimerkiksi palkin jatkokset ja kehänurkat jäykiksi.

Kantaviin rakenteisiin tehtävissä liitoksissa on käytettävä vähintään neljää, halkaisijaltaan 8 mm olevaa tappivaarnaa sekä sidepulttia, jota ei oteta huomioon liitoksen mitoituksessa. Tappivaarnaliitokset mitoitetaan puikkoliitosteorian mukaisesti. Vaarnaliitoksen siirtymät lasketaan pulttiliitosten tapaan. Koska tappivaarnat lyödään aina halkaisijaansa pienempään reikään, ei niiden siirtymiä laskettaessa oteta huomioon liitoksen alkuväljyyttä.

Tappivaarnoja varten tehtävät reiät ja tappien ympärille syntyvät halkeamat heikentävät liitettävien kappaleiden poikkileikkausta. Kun tappivaarnojen avulla siirretään suuria voimia, on vaarnojen määrä usein niin suuri, että liitettävien kappaleiden poikkileikkausta joudutaan kasvattamaan, jotta puun heikennykset eivät muodostu sallittua suuremmiksi. Liitokset tulee lisäksi suunnitella niin, että puuta halkaiseva poikittainen vetojännitys on mahdollisimman pieni. Koska tappivaarnojen lukumäärä liitoksessa on yleensä suuri, jakautuu liitokseen vaikuttava voima useammalle liittimelle, jolloin puun halkeilu jakautuu tasaisemmin puun poikkileikkaukseen kuin pulttiliitoksessa, ja halkeamat jäävät pienemmiksi.

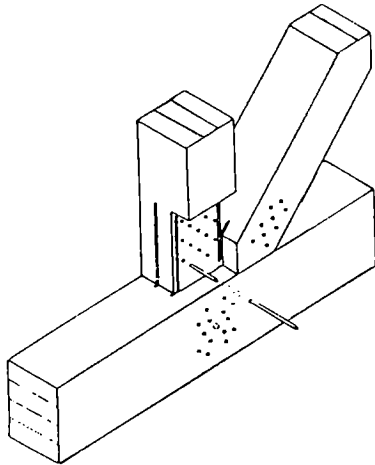
Vaarnaliitoksissa voidaan käyttää puun sisään sahattuihin uriin asennettavia teräslevyjä. Teräslevyjä käytettäessä porataan niihin vaarnan kokoiset reiät. Liitos on koottava heti puun porauksen jälkeen, sillä pienetkin puun kosteusmuodonmuutokset hankaloittavat vaarnojen asentamista. Teräslevyjen avulla liitos saadaan monileikkeiseksi, jolloin yksittäisten vaarnojen kapasiteetti hyödynnetään parhaiten. Tällöin tulee puussa poikittaissuunnassa olevien reunimmaisten vaarnojen etäisyyden toisistaan olla mahdollisimman pieni, jotta puu ei kuivuessaan ja kutistuessaan halkea. Mikäli käytettävä teräslevy on jäykkä, estää se järeän puun poikkileikkauksen vääntymisen, jolloin puuhun syntyy lisäjännityksiä ja seurauksena saattaa olla puun halkeilua. Liitoksen palonkesto säilyy teräslevyjen ollessa puun sisällä.

Teräksen sijasta käytetään liitoksissa myös koivuvanerilevyjä, joiden reunapuristuslujuus on parempi kuin puun. Esimerkiksi käytettäessä halkaisijaltaan 6 mm olevia liittimiä, on koivuvanerin reunapuristuslujuus 20 N/mm². Vaneria käytettäessä voivat pienet kosteusmuodonmuutokset liitettävissä kappaleissa tapahtua ilman vaurioita kappaleessa 4.1.2 esitettyyn tapaan.

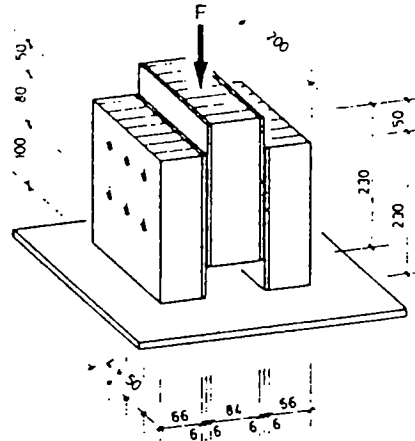
Saksassa käytetään järeää puuta ja liimapuuta liitettäessä tappivaarnoihin ja metallilevyihin perustuvaa liitostekniikkaa, joka tunnetaan kaupallisella nimellä BSB. Tällöin liitettäviin puihin sahataan raot 5 mm paksuja teräslevyjä (Fe37) varten. Levyjen välinen etäisyys on vähintään 40 mm, ja levyjen määrä korkeintaan 8. Levyihin tehdään reiät

6,3 mm paksuja vaarnoja (Fe37) varten ja liitettäviin kappaleisiin 6 mm:n kokoiset reiät tarkasti samoihin kohtiin.

Tämän jälkeen teräslevyt asetetaan paikoilleen ja vaarnat puristetaan reikiin. Liitoksen lujuus määräytyy käytettävien levyjen ja vaarnojen määrän perusteella. BSB-liitoksessa ei käytetä sidepultteja, vaan liitoksen löystyminen estyy vaarnojen taipuessa voiman vaikutuksesta, jolloin ne pysyvät tiukasti paikoillaan puun kutistuessa ja vääntyessä. BSB-liitos on esitetty kuvassa 4.11.



Kuva 4.11. BSB-liitos /13/.
Figure 4.11. BSB-joint /13/.



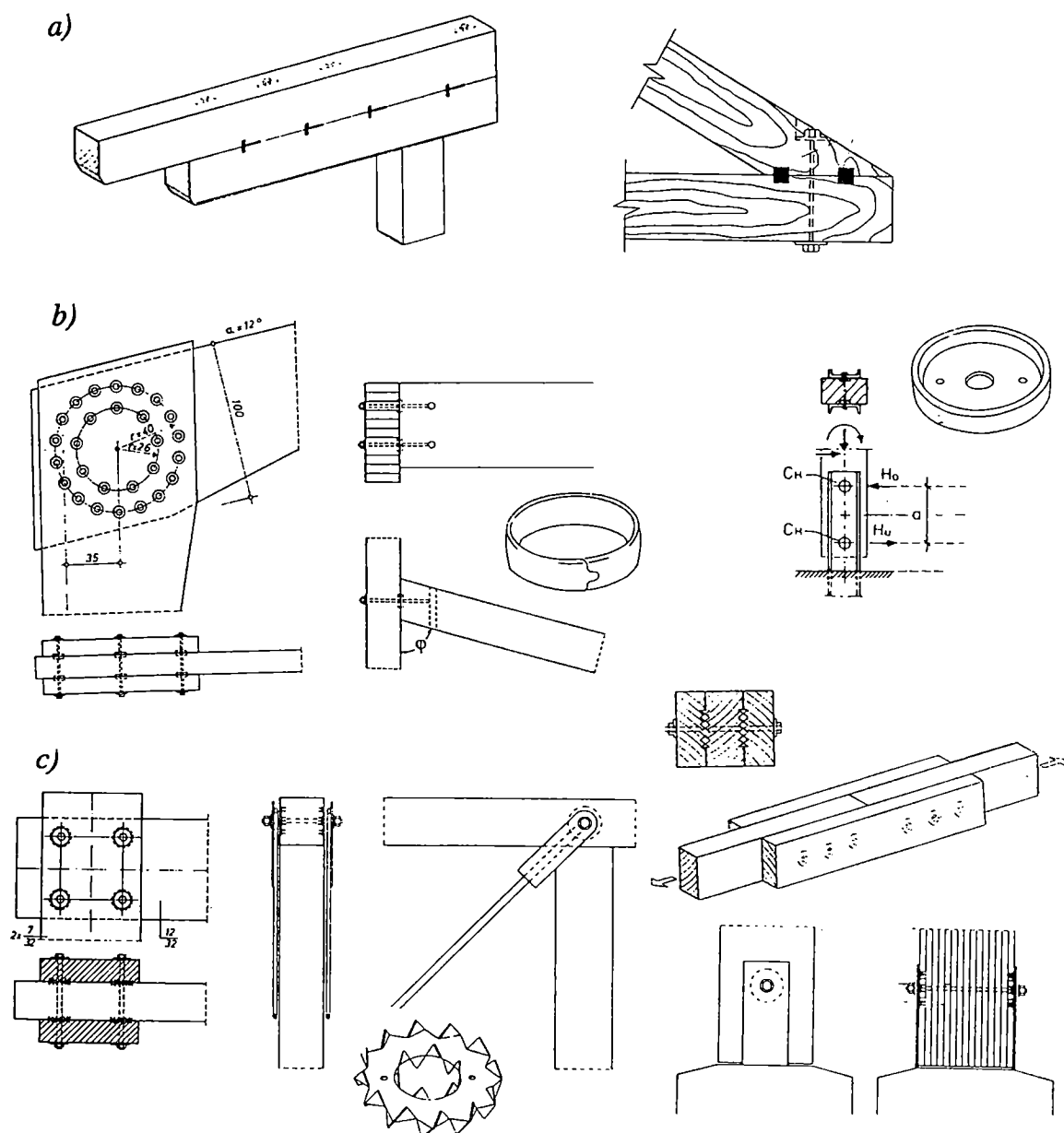
Kuva 4.12. Liimatulla vanerilla vahvistettu tappivaarnaliitos /4/.

Figure 4.12. A dowel joint which is strengthened with glued plywood /4/.

Saksassa on tutkittu tappivaarnaliitoksien lujuuden kasvattamista käyttämällä liitettäviin kappaleisiin liitospinnoille kuvan 4.12 mukaisesti liimattavaa erikoistiheätä vaneria. Puuhun liimatun vanerin toiminta liitoksessa perustuu liitosalueen halkeilun vähenemiseen puun poikittaisen vetolujuuden kasvaessa sekä puun reunapuristuslujuuden kasvamiseen suurimman reunapuristuksen alueella. Käytettäessä liitospinnoille liimattua vaneria, voidaan kasvattaa liittimiä ja vähentää niiden määrää ilman halkeiluvaaraa /6/.

4.1.4.2 Hammas-, ura- ja suorakaidevaarnaliitokset

Vaarnat voivat olla valmiiseen uraan, koloon tai reikään asennettavia, pakkokeinoin puuhun puristettavia tai näiden yhdistelmiä. Valmiiseen koloon tai uraan asennettavia vaarnoja ovat suorakaide-, rengas- ja lautasvaarnat. Vanhin vaarnatyyppe on niin sanottu kirvesmiesvaarna tai suorakaidevaarna, joka tehdään kovasta, hyvin kuivatusta puusta, Suomessa yleensä koivusta. Puisten suorakaidevaarnojen käyttö on nykyään melko vähäistä. Sen sijaan käytetään T-muotoisia teräsvaarnoja, jotka leikataan sopivista profiilitangoista, sekä rengas- ja lautasvaarnoja. Pakkokeinoin puuhun puristetaan erilaiset hammaslevyt. Vaarnoja käytetään liitettäessä järeää puuta puuhun, teräkseen tai betoniin. Vaarnaliitoksia voidaan käyttää järeästä sahatavarasta tehdyissä kehänurkissa, pilari-palkki-liitoksissa ja palkin jatkoksissa. Kuvassa 4.13 on esitetty erilaisia vaarnaliitoksia.



Kuva 4.13. Erilaisia vaarnaliitoksia. Vaarnana a) suorakaidevaarna, b) rengasvaarna ja lautasvaarna sekä

c) hammasvaarna.
Figure 4.13. Examples of shear connectors: a) rectangular shear connector, b) ring shear connector, c) toothed shear connector.

Vaarnat kasvattavat liitoksen kantokykyä jakamalla rasituksia suuremmalle alalle kuin esimerkiksi pulttiliitoksessa. Pääosa vaarnaliitokseen vaikuttavasta voimasta siirretään liitettävältä kappaleelta toiselle vaarnojen avulla. Liitoksessa käytetyt pultit pitävät liitettäviä kappaleita yhdessä puun kutistuessa ja vääntyessä sekä kantavat vaaraan syntyvästä momentista aiheutuvan saumapintaa vasten kohtisuoran voimakomponentin. Vaarnaliitoksen lujuus riippuu vaarnojen koosta ja tyypistä, puulajista, vaarnojen etäisyydestä toisistaan ja liitettävien puiden päistä, kuorman vaikutussuunnan ja puun syysuunnan

välisestä kulmasta sekä mm. puun kosteudesta ja sen vaihtelusta. Vaarnojen etäisyyksille toisistaan ja puun reunoista on asetettu minimiarvot.

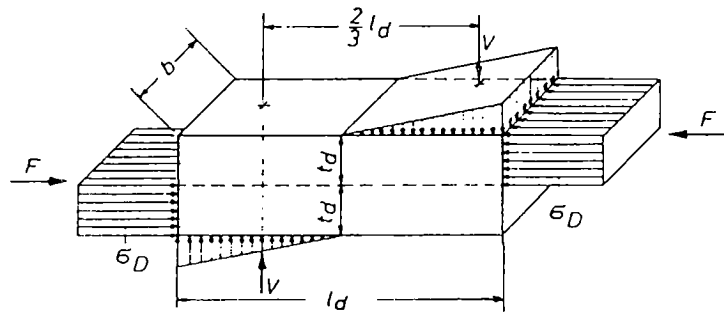
Suorakaide- ja T-vaarnojen asennuskolot tehdään yleensä jyrsimen, poran, sahan tai taltan avulla. Suorakaidevaarvoja voidaan käyttää esimerkiksi järeissä vaarnapalkeissa. Vaarnat mitoitetaan liitettävien kappaleiden syiden suuntaisen puristuslujuuden f_c perusteella, jolloin voidaan laskea vaarnan vähimmäiskorkeus liitettävissä kappaleissa (4)

$$t_d \geq \frac{F}{f_c \cdot b} \quad (4)$$

Kaavassa esiintyvät merkinnät selviävät kuvasta 4.14. Suorakaidevaarnan tulee olla mahdollisimman matala, jotta liitettävien kappaleiden poikkileikkauksien heikennys ja vaarnaan syntyvä momentti jäävät minimiin.

Suorakaidevaarnan hoikkuuden l_d/t_c tulee olla suurempi kuin 5. Tällöin vaarnaan syntyvä momentti jää niin pieneksi, että sidepultiksi riittää yleensä halkaisijaltaan 12...16 mm paksu pultti.

Suorakaidevaarnaliitosten jäykkyys riippuu vaarnaan varten tehdyn kolon tarkkuudesta ja mahdollisista puun kosteusmuodonmuutoksista. Suorakaidevaarnan mitoituksessa tulee tarkistaa, että :



Kuva 4.14. Suorakaidevaarnan jännitysjaakauma /11/.

Figure 4.14. The stress distribution on rectangular shear connector 11/.

- a) liitettävien puiden syiden suuntainen puristuslujuus f_c ei ylitä.

$$F \leq f_c \cdot t_d \cdot b \quad (5)$$

- b) vaarnan leikkauslujuus $f_{v,vaarna}$ ei ylitä.

$$F \leq f_{v,vaarna} \cdot l_d \cdot b \quad (6)$$

- c) puun syitä vastaan kohtisuora puristuslujuus $f_{c\perp}$ ei ylitä vaarnaan syntyvän taivutusmomentin ansioista.

$$F \leq f_{c\perp} \cdot l_d^2 \cdot b / (6t_d) \quad (7)$$

- d) liitosta koossapitävä pultti kantaa kohtisuoraan liitospintaa vasten vaikuttavan voiman, jonka aiheuttaa vaarnaan syntyvä taivutusmomentti.

- e) liitettävien kappaleiden lujuus ei ylitä jäljellä olevassa poikkileikkauksessa. Poikkileikkauksala saadaan vähentämällä vaarnan kohtisuoran projektion ala sekä mahdolliset oksat kappaleen alasta.

Valmiiseen uraan tai koloon asennettavien erityisvaarujen asennusurat tehdään pultin reiän porauksen jälkeen jyrsimellä, jossa käytetään vaarujen valmistajalta saatavaa erityisterää. Rengasvaarna asetetaan puoliksi kumpaankin liitettävään kappaleeseen tehtyyn uraan.

Rengasvaarna on poikkileikkaukseltaan kartion muotoinen ympyrärengas, joka katkaistuna voi liikkua urassaan järeän puun kosteusliikkeiden mukaan. Lautasvaarvoja käytetään pareittain liitospinnan molemmin puolin. Liitettäessä puuta teräkseen käytetään vain yhtä lautasvaarna.

Valmiiseen uraan asennettavien vaarujen liitoksien lujuus riippuu puun leikkaus- ja puristuslujuudesta, joiksi oletetaan vaarnan leikkauskapasiteettia määritettäessä 2 ja 17 N/mm². Vaarna puristuu voiman suunnassa olevaan puuhun. Renkaan voimaa vastaanottavana pintana on joko vaarnan sisä- tai ulkopinta. Mikäli vaarujen taulukossa 8 esitetyt minimietäisyydet toteutuvat, voidaan vaarnat mitoittaa yksistään pintapuristuksen perusteella. Rengasvaarnaliitoksissa vaarnan lujuuteen lisätään pultin leikkauslujuus, lautasvaarnaliitoksissa pultin lujuutta ei oteta huomioon. Liitettävien osien leveys vaikuttaa liitoksen lujuuteen.

Taulukko 4.2. Rengasvaarnaliitoksiin liittyvien mittojen pienimpiä ja suurimpia arvoja /10/.

Table 4.2. Maximum and minimum dimensions of ring connector joints /10/.

Renkaan ulkohal- kaisija <i>Outer diameter of ring</i> D mm	Porattavan uurteen ul- kohalkaisija <i>Outer diameter of groove</i> D mm	Renkaan suurin sallittu leveys <i>Max. allowed width of ring</i> b mm	Porattavan uurteen leveys <i>Width of groove</i> mm	Pienin sallit- tu pultin halkaisija <i>Min. allowed diameter of screw</i> mm	Pienin puutavaran paksuus <i>Min. thickness of wood (mm)</i>	
					Sivupuu <i>Side</i>	Keskipuu <i>Middle</i>
66	67	19	4,5	10	38	50
100	102	26	5,5	16	38	50
125	127	28	6,5	16	50	63
150	153	32	6,5	16	50	63
175	178	36	7,0	19	63	75

Puun tiheys vaikuttaa suuresti rengasvaarnaliitoksen lujuuteen. Jos voima vaikuttaa tietyssä kulmassa vaarnaliitokseen, lasketaan liitoksen lujuus Hankinsonin kaavalla. Leikkausvoiman vaikuttaessa liitokseen vinosti syiden suuntaan nähden silloin, kun tukipiste ei ole liitoksen kohdalla estämässä puun halkeamista, rajoitetaan syiden suuntaa vastaan vaikuttavaa leikkausvoimakomponenttia V kaavan (8) avulla

$$V \leq \frac{2}{3} f_v \cdot b_e \cdot t \quad (8)$$

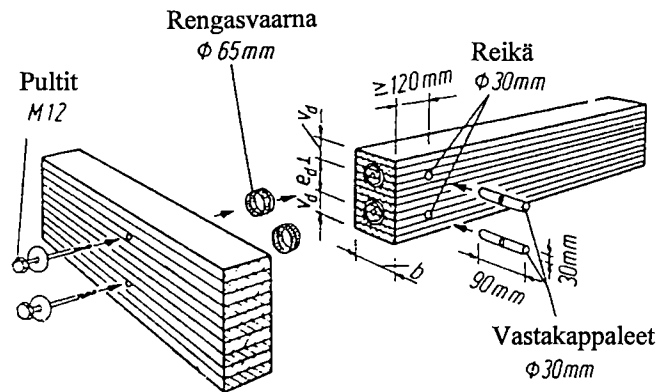
missä

f_v = puun leikkauslujuus

b_e = vaarnan ulkoreunan etäisyys puun kuormitetusta reunasta

t = puun paksuus.

Rengasvaarvoja ja hammasvaarvoja voidaan käyttää myös päätypuussa liitettäessä palkkia jatkuvaan pilariin tai sekundääripalkkia primääriin kuvan 21 mukaisesti. Liitoksen muodostavat palkkien väliin asennetut $\varnothing 65\text{...}126\text{ mm}$ rengasvaarnat, sidepultit M12 sekä näiden vastakappaleet, joihin yleensä käytetään noin 90 mm pitkiä ja $\varnothing 30\text{ mm}$ terästankoja, joissa kierreet ovat halkaisijan suunnassa. Näin tehty liitos on kaunis ja paloteknisesti hyvä.



Kuva 4.15. Palkin vaarnaliitos toisen palkin kylkeen /7/.

Figure 4.15. A shear connection of a beam to the side of another beam.

Päätypuuhun tehdyn rengasvaarnaliitoksen mitoitusohjeet on johdettu kokeellisesti liimapuulle käyttäen vähintään varmuuskerrointa 2,75. Mitoitettaessa järeisiin puurakenteisiin tehtäviä liitoksia jää varmuuskerroin pienemmäksi puun pienemmän lujuuden takia. Järeän sahatavaran päätyhalkeilun takia tulee vastakappaleen vapaan välin pituuden olla vähintään 120 mm. Yhtä vaarna kohti tuleva sallittu leikkausvoima (9) on

$$F = 5,76(10D + b) + 29,4e \quad (9)$$

missä

D = vaarnan halkaisija

b = sekundääripalkin leveys [mm], $1,6D \leq b \leq 4,4D$

e_r = vaarnan etäisyys palkin reunasta [mm], $0,8D \leq e_r \leq 2,2D$ /9/.

Mikäli sekundääripalkin leveydelle ja vaarnan etäisyydelle palkin reunasta asetetut ehdot eivät toteudu, käytetään korjauskertoimia :

- Jos vaarvoja on 3...5 peräkkäin samassa rivissä, lisätään kaavaan (9) kerroin $k_n = 1,2$.
- Jos palkkien välinen kulma α pienenee ($45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$), kasvaa liitoksen lujuus kertoimella k_o .

$$k_o = \frac{1}{\sin^2 \alpha + \frac{F_{(\alpha=90^\circ)}}{F_{(\alpha=0^\circ)}} \cos^2 \alpha} \quad (10)$$

missä $F_{(\alpha=0^\circ)}$ on rengasvaarnaliitokselle sallittu leikkauslujuus päätypuussa

$F_{(\alpha=90^\circ)}$ on puurakenteiden suunnitteluohjeen mukaan määritetty rengasvaarnan sallittu leikkauslujuus puun syysuunnassa.

Puuhun puristettavien vaarujen asennuksessa käytetään hydraulisia puristimia, ruuvipuristimia tai erikoislujia pultteja. Hammasvaaran puristaminen havupuuhun vaatii noin 5 N/mm^2 puristuspaineen koko vaaran alalle. Pienten vaarujen puristamiseen riittää erikoislujia pultti, jolloin pultin aluslevyjen on oltava vähintään vaaran kokoiset ja paksuudeltaan 0,1 kertaa vaaran halkaisija. Puristuksen jälkeen pultin reikään asennetaan tavallinen, rakenteeseen tarkoitettu pultti. Jos rakenteeseen tuleva pultti on yli 15 mm paksu, voidaan vaarna puristaa puuhun sen avulla. Kaksipuolisia hammasvaarvoja käytetään liittäessä puuta puuhun. Toispuolisesti hammastettuja vaarvoja käytetään liittäessä puuta teräkseen tai betoniin sekä tehtäessä liitoksia, jotka halutaan purkaa myöhemmin.

Hammasvaarujen kantokyvyn teoreettinen arviointi on hyvin epävarmaa. Sekä pultti että vaarna kantavat osan kuormista. Näille erikseen määritettyjä kantokykyjä ei voida suoraan laskea yhteen, koska tällöin kitkan vaikutus otettaisiin kahdesti huomioon. Siksi hammasvaarnaliitosten lujuudet määritetään kokeellisesti tietyille vaaruille, pulteille ja puupaksuuksille. Kokeellisesti määritettyjä taulukon 4.3 mukaisia hammasvaarujen leikkauskapasiteetteja esitetään kirjallisuudessa.

Ohuemman puun paksuus (mm)	Pultti Φ (mm)	$\Phi 50 \text{ mm}$		$\Phi 62 \text{ mm}$		$\Phi 70 \text{ mm}$		$\Phi 93 \text{ mm}$		$\Phi 112 \text{ mm}$		70x125 mm		$\Phi 100 \text{ mm}$		$\Phi 125 \text{ mm}$	
		1-leikkeinen	2-leikkeinen	1-leikkeinen	2-leikkeinen	1-leikkeinen	2-leikkeinen	1-leikkeinen	2-leikkeinen	1-leikkeinen	2-leikkeinen	1-leikkeinen	2-leikkeinen	1-leikkeinen	2-leikkeinen	1-leikkeinen	2-leikkeinen
25	12	7,0	8,0	8,0	9,0												
	16	8,0	9,0	9,0	10,0												
38	12	8,0	9,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0								
	16	9,0	10,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	16,0					18,0	20,0		
	19					13,0	14,0	15,0	17,0					19,0	21,0		
50	12	9,0	10,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0								
	16	10,0	11,0	11,0	13,0	13,0	15,0	15,0	17,0	21,0	23,0	17,0	19,0	19,0	22,0		
	19					14,0	17,0	16,0	18,0	22,0	24,0	18,0	20,0	20,0	23,0	25,0	29,0
	22									22,0	25,0	18,0	21,0	21,0	24,0	26,0	31,0
75	25									23,0	26,0	19,0	23,0	22,0	26,0	27,0	32,0
	12					12,0	13,0	15,0	16,0								
	16					14,0	16,0	17,0	18,0	23,0	25,0	19,0	20,0	22,0	23,0		
	19					16,0	19,0	19,0	21,0	24,0	27,0	20,0	23,0	23,0	26,0	28,0	32,0
	22									25,0	29,0	21,0	25,0	24,0	29,0	29,0	35,0
25									26,0	31,0	22,0	28,0	25,0	31,0	30,0	38,0	
29															34,0	42,0	

Taulukko 4.3. Hammasvaarujen ominaisleikkauskapasiteetti kuorman aikaluokassa B yhtä vaarna ja pultin leikettä kohti kosteusluokissa 1 ja 2 [kN] /12/.

Table 4.3. Characteristic design loads for toothed shear connectors. /12/.

Hammasvaarnaliitoksen lujuus on lähes riippumaton käytetyn liittimen koosta, tietyt minimimitat ylittävien puiden koosta sekä voiman ja puun syysuunnan välisestä kulmasta. Hammasvaarnaliitosten siirtymäksi käyttötilan kuormilla voidaan aikaluokassa B ja kosteusluokassa 2 arvioida 1 mm.

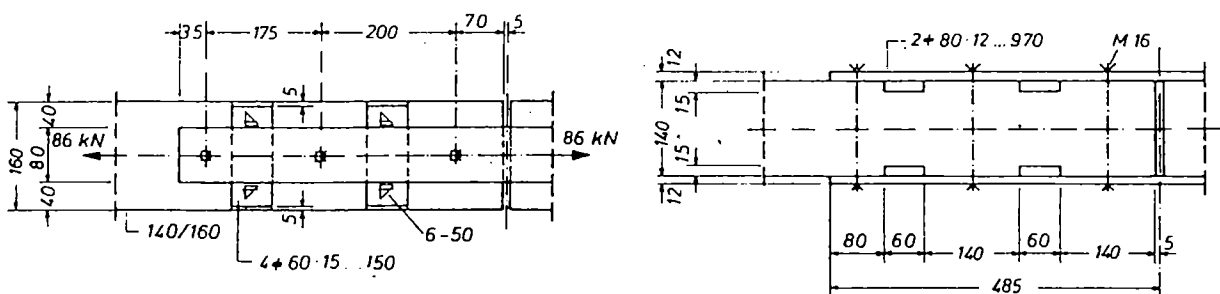
Järeissä puurakenteissa joudutaan usein sijoittamaan monta vaarnaa peräkkäin, jolloin voima ei jakaudu tasaisesti liittimille, vaan reunimmaisat vaarnat kantavat suurimmat kuormat. Tämä pienentää liittintä kohti tulevaa keskimääräistä kapasiteettia, joka otetaan mitoituksessa huomioon redusoimalla liittimien sallittua leikkausvoimaa peräkkäisten liittimien määrästä riippuvalla kertoimella. Vaarnapalkeissa redusointia ei tarvitse tehdä. Jos perättäisten vaarnojen lukumäärä on yli 2, tehollisten vaarnojen lukumäärä voiman suunnassa arvioidaan kaavalla 11.

$$n_{ef} = 2 + (1 - n/20)(n - 2) \quad (11)$$

missä n on perättäisten vaarnojen lukumäärä.

Yleensä vaarnat ja pultit tulee sijoittaa pareittain symmetrisesti sauvan keskiviivan suhteen sekä mahdollisesti syvyysuunnassa vuorotellen sauman vastakkaisille puolille, jotta järeän puun kuivumishalkeamat eivät vaarana kaikkien samassa jonossa olevien vaarnojen kantokykyä.

Vaarnaliitoksessa käytetään usein teräksisiä sivulevyjä. Teräslevyjä käytettäessä voidaan syiden suuntaisen voiman sallia olevan noin 10 % suurempi, koska voima jakautuu tasaisesti vaarnoille, eivätkä vaarnat pääse taipumaan teräslevyn alla. Sivulevyjen avulla tehdyissä vetoliitoksissa ja käytettäessä vaarnoja, joiden halkaisija on yli 125 mm, tulee liitoksen päihin sijoittaa kuvan 4.16 mukaisesti erilliset kiristyspultit, jotta liitettävät puut ja sivulevyt eivät vaaraan tulevan taivutusmomentin takia väännä irti toisistaan. Kun rakenteessa käytettävä järeä sahatavara on kostea tai rakenne on lämmitetyssä, kuivassa tilassa, voidaan järeän puun poikkileikkauksen vääntymisen takia käyttää myös ylimääräistä sidepulttia vaarnaliitoksen päissä.



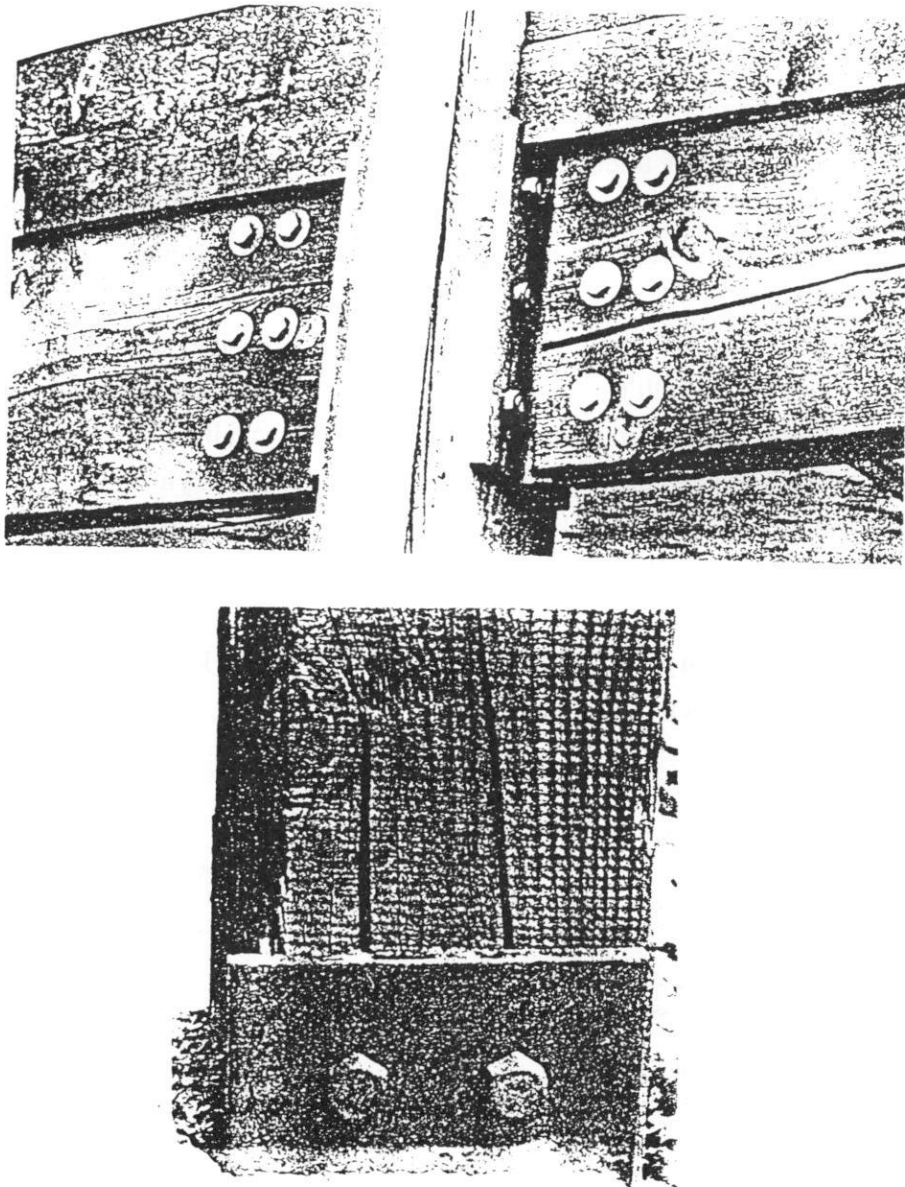
Kuva 4.16. Metallisin sivulevyin tehty vaarnaliitos. Kun terästanko hitsataan kiinni vaarnoihin saadaan jäykkä liitos /11/.

Figure 4.16. A joint with shear connectors and metal plates.

4.1.5 Metalliset liitoselimet

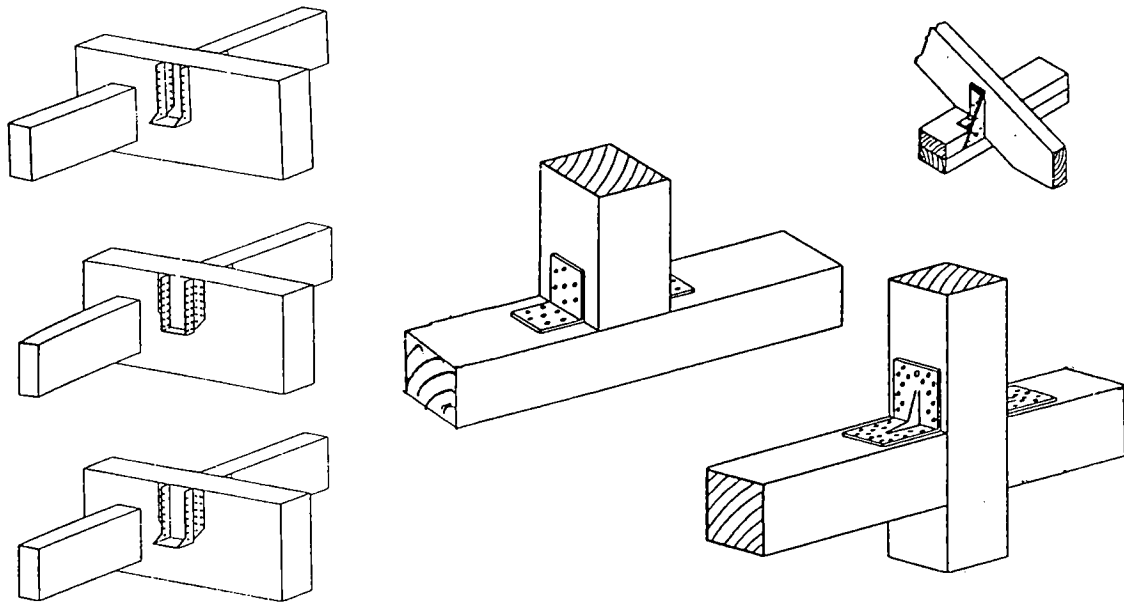
Metalliset liitoselimet ovat teräksestä tehtyjä, muotoon leikattuja, taivutettuja ja hitsattuja kiinnikkeitä. Liittiminä käytetään nauloja, pultteja tai tappivaarvoja. Liitososat ovat yleensä 2...10 mm paksua terästä, jolloin liitettävien kappaleiden kuivumismuodonmuutokset on otettava liitoskappaleita ja liitoksia suunniteltaessa huomioon edellä naulauslevy-, pultti- ja tappivaarnaliitosten yhteydessä esitetyillä tavoilla, jotta vältetään kuvassa 4.17 esitetyltä puun halkeilulta liitosalueella. Liitoksen palonkestävyys riippuu liitoselimen sijoittelusta. Mikäli liitoselin sijoitetaan puuhun tehtyyn uraan tai kahden puukappaleen väliin, on liitoksen palonkesto hyvä.

Mikäli liitoselimet jäävät näkyviin, tulee ne yleensä suojata palonsuojamaalilla tai erillisillä puukoteloilla. Lisäksi metalliset liitoselimet on yleensä suojattava korroosiolta.



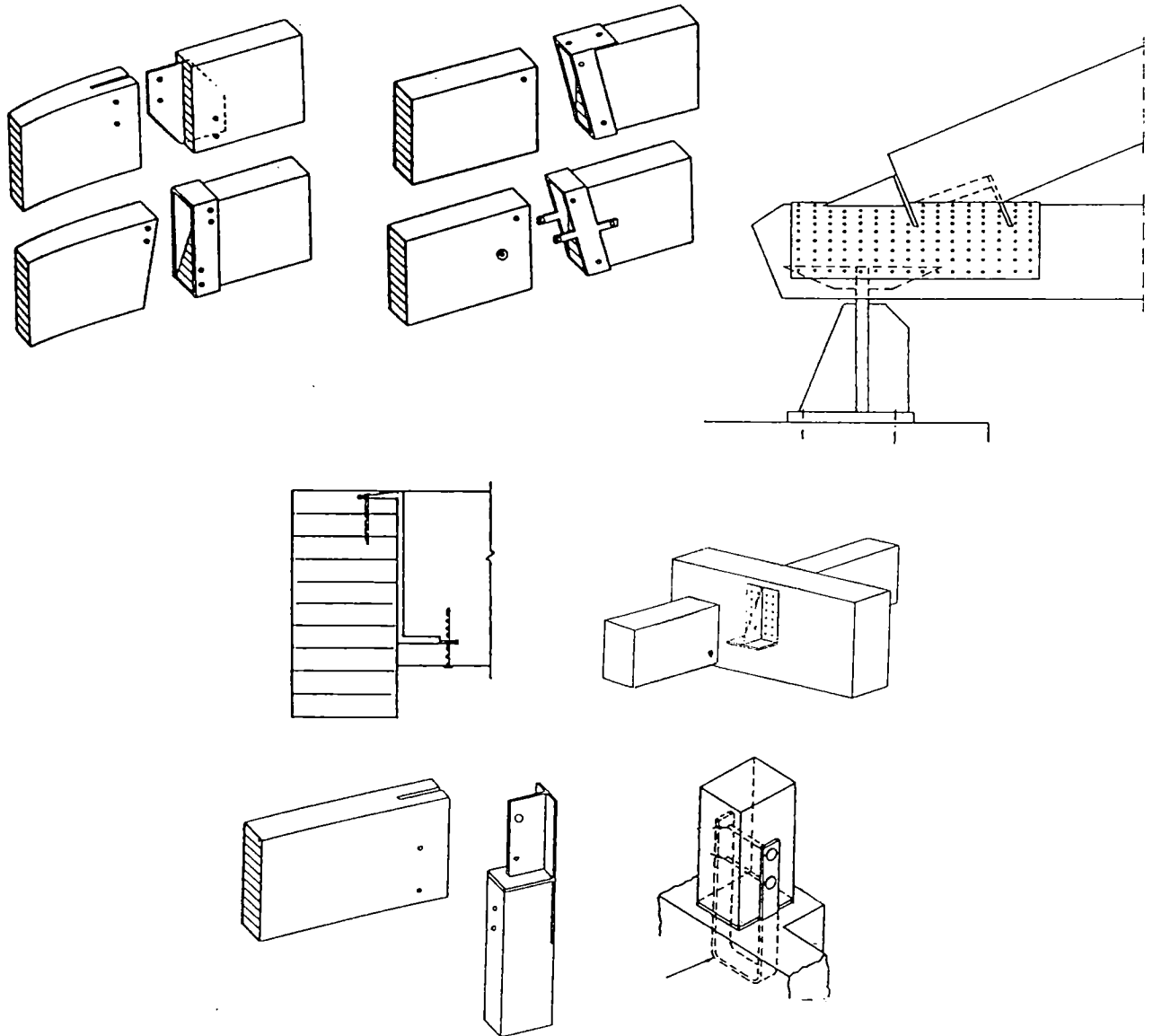
Kuva 4.17. Huonosti suunniteltuja järeiden puurakenteiden liitoksia /14/.
Figure 4.17. Some design mistakes in the large size timber joints .

Muotokiinnikkeillä voidaan liittää sekundäärirakenteita primäärirakenteisiin ja varmistaa puristusliitoksissa liitettävien kappaleiden paikalla pysyminen. Muotokiinnikkeet valmistetaan yleensä 2 mm paksusta teräksestä ja liitetään puuhun erikoisnauloilla. Valmistajat julkaisevat liitoksien mitoitusarvot ja -ohjeet tekemiään kiinnikkeitä varten. Järeän sahatavaran vääntyminen aiheuttaa muotokiinnikkeille lisärasituksia, jotka voivat heikentää liitoksia. Liitoksia tehtäessä on kiinnike sijoitettava niin, että kumpaankaan liitettävään kappaleeseen ei synny poikittaista vetoa. Kuvassa 4.18 on esitetty erilaisia muotokiinnikkein tehtyjä liitoksia.



Kuva 4.18. Erilaisia muotokiinnikkeiden avulla tehtyjä liitoksia.
Figure 4.18. Some joints with formed plate connectors.

Siirrettäessä suuria voimia on metallisten liitoselinten oltava järeämpiä. Tällöin käytetään paksummasta teräksestä hitsaamalla tehtyjä liitoselimiä, jotka yleensä pultataan tai tapitetaan kiinni puuhun. Järeät liitoselimet suunnitellaan usein varta vasten rakennettavaan kohteeseen. Liitoselimet mitoitetaan teräsosina kantamaan niihin liitoksessa kohdistuvat rasitukset. Poikittaissuunnassa puussa olevien suurten metallisten liitoselinten pultinreiät on tehtävä soikeiksi puun kutistumisen takia. Lisäksi pultit on sijoitettava niin, että puuhun ei synny poikittaista vetoa, ja että liittimien reunaetäisyydet ovat riittävät. Liitoselimet pystyvät yleensä vastustamaan järeän puun vääntymistä, mutta puu saattaa tällöin haljeta. Mikäli liitoselin tehdään kapeaksi, pääsee puu osittain vääntymään. Kuvassa 4.19 on erilaisia metallisten liitoselinten avulla tehtyjä liitoksia.

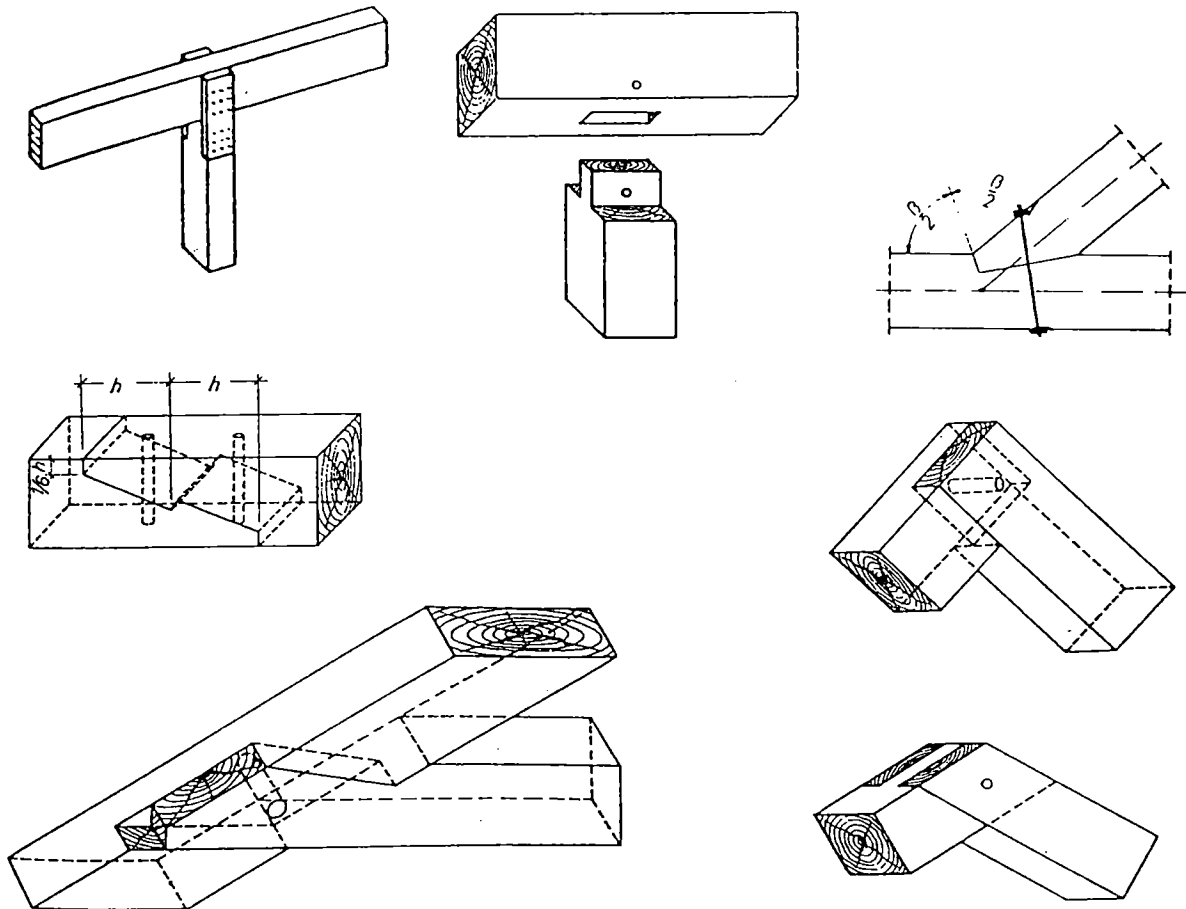


Kuva 4.19. Erilaisia järeiden liitospelimien avulla tehtyjä liitoksia.
Figure 4.19. Some metal plate connectors.

4.2 Kontaktiliitokset

Kontaktiliitokset eli ns. kirvesmiesliitokset ovat perinteisiä puurakenteiden liitoksia, joissa voima siirtyy puristuksena kosketuspinnassa kappaleelta toiselle ilman liittimiä. Liitettävien kappaleiden paikoillaan pysyminen puun kutistuessa ja vääntyessä sekä rakenteen asennusvaiheessa varmistetaan liittimillä. Mikäli puuhun tulee leikkausmurto, varmistetaan liittimillä myös liitoksen lujuus, vaikka tällöin muodonmuutokset kasvavat yleensä sallittua suuremmiksi. Kontaktiliitos on ainekustannuksiltaan edullinen liitos, sillä suuret metalliset liittimet ovat usein puurakenteen kallein osa, ja lisäksi ne heikentävät rakenteen palonkestävyyttä.

Kontaktiliitosten käyttö on Suomessa rajoittunut vain yksinkertaisimpiin puristettuihin kosketusliitoksiin. Pienipoikkileikkauksiin puuosiin ei ole voitu tehdä niiden kantokykyä heikentäviä loveuksia. Lisäksi kontaktiliitosten valmistus on hitaampaa kuin mekaanisen liitosten. Keski-Euroopassa on vielä yleisessä käytössä kuvassa 4.20 esitettyjä kosketusliitostyyppejä, jotka monessa tapauksessa on todettu helpoimmaksi ja varmimmaksi tavaksi liittää puuta.



Kuva 4.20. Erilaisia kontaktiliitoksia.

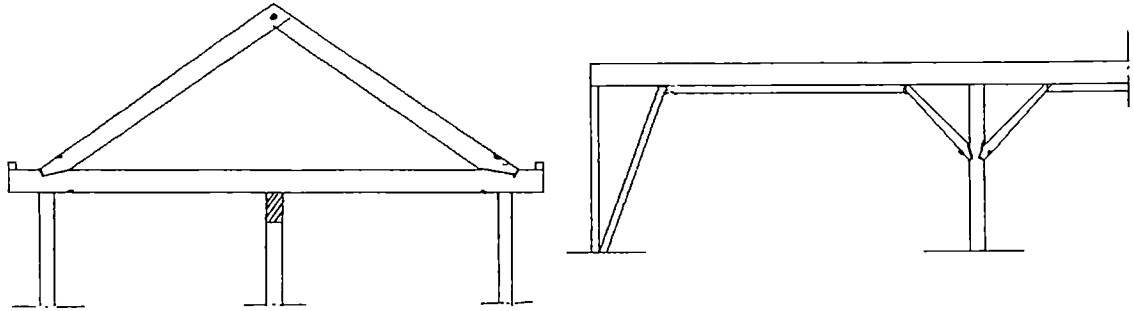
Figure 4.20. Some examples of hand-cut connections.

Kontaktiliitoksia on perinteisesti käytetty liitettäessä suuria puuosia toisiinsa. Järeätä puutavaraa käytettäessä kirvesmiesliitoksilla on mahdollista koota edullinen, suuriakin kuormia siirtävä rakenne. Puiden loveaminen vaatii erityistä tarkkuutta. Valmistustarkkuudesta riippumatta vaikuttaa liitoksen kantokykyyn myös liitettävien puiden kosteusmuodonmuutokset, jotka on otettava huomioon liitosten suunnittelussa. Moitteettoman kontaktiliitoksen edellytyksenä on, että

- kosketuspinnat sopivat hyvin vastakkain ja liitettävien kappaleiden pituus on suunnitelmien mukainen
- pyritään käyttämään puuta, jonka tasapainokosteus on mahdollisimman lähellä lopullista tasapainokosteutta. Tällöin puun kosteusmuodonmuutokset jäävät minimiin /9/.

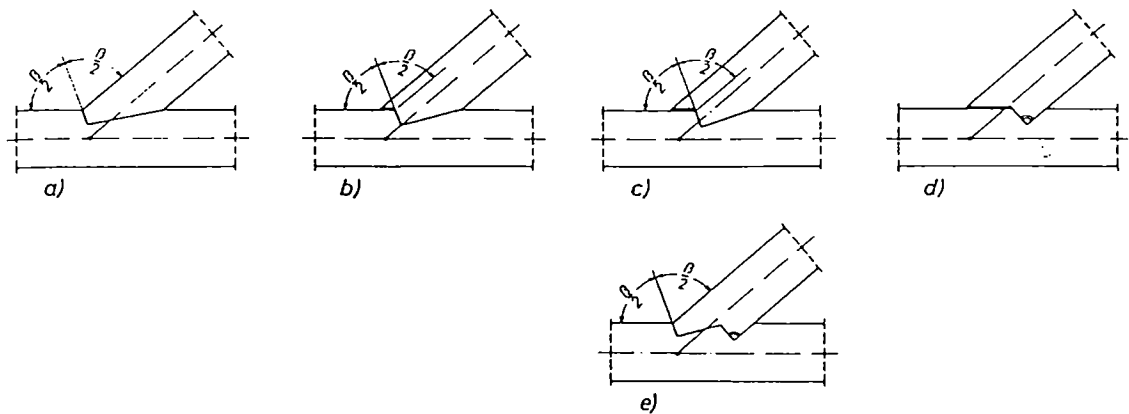
4.2.1 Vinokulmainen loviliitos

Vinokulmaista loviliitosta voidaan käyttää puristusliitoksissa, joissa kappaleet liittyvät toisiinsa tiettyssä kulmassa. Tällaisia rakenteita ovat esimerkiksi ns. vitaposkirakenteet sekä erilaiset ristikot kuvan 4.21 mukaisesti. Saksassa loviliitos on vielä yleisessä käytössä, vaikka Suomessa sen käyttö on nykyään vähäistä. Liitoksen etuna on suuri voimien siirtokyky ilman kalliita liittimiä sekä esteettisyys näkyviin jäävissä rakenteissa.



Kuva 4.21. Vinokulmaisoin loviliitoksin tehtyjä rakenteita.
Figure 4.21. Constructions with head notch joints.

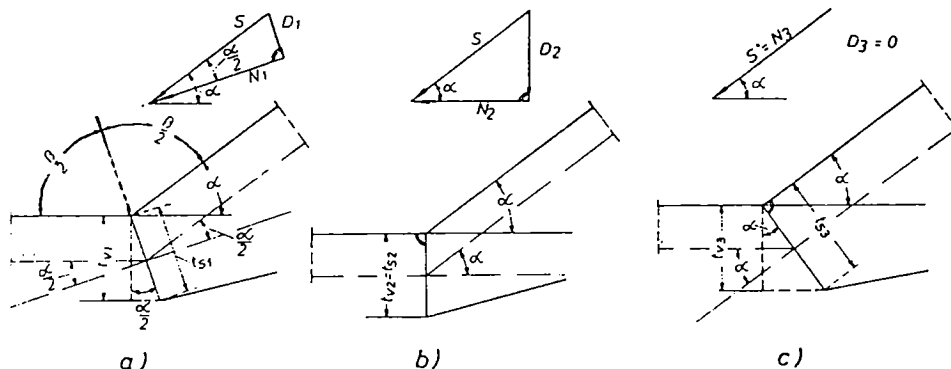
Loviliitoksissa voima siirtyy pääasiassa lyhyen lovipinnan kautta. Liitokset jaetaan lyhyen lovipinnan sijainnin mukaan viiteen ryhmään. Tässä tarkastellaan lähemmin kuvassa 4.22 a) esitettyä loviliitosta, jonka valmistus on helpointa ja toiminta varmintä. Kun rakenteissa käytetään pyöreää puutavaraa, tehdään loviliitokset kuvien 4.22 b), c) tai e) mukaisesti, jolloin puristuspinna saadaan suuremmaksi pienemmällä lovisyvyydellä.



Kuva 4.22. Erilaisia loviliitoksia /11/.
Figure 4.22. Some examples of notched joints /11/.

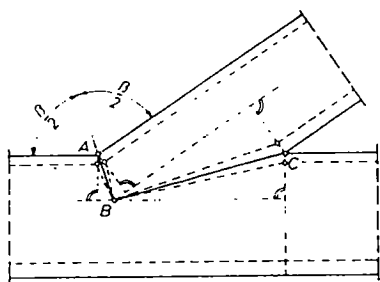
Lyhyen puristuspinnan kaltevuus vaikuttaa liitoksen välittämän voiman jakautumiseen komponentteihin. Optimaalinen liitos saadaan, kun lyhyen pinnan kaltevuuskulma puolittaa kappaleiden välisen tylpän liittymiskulman β . Tällöin lyhyellä lovipinnalla vaikuttavan voimakomponentin ja syiden suunnan välinen kulma on molemmissa

kappaleissa $\alpha/2$, joka on lovipinnan puristuslujuutta laskettaessa pienin mahdollinen kulma. Kuvassa 4.23 on esitetty edellä mainittu tapaus sekä kaksi ääritapausta lyhyen lovipinnan kaltevuuden perusteella. Valmistustarkkuudesta johtuen pinnan kaltevuus poikkeaa yleensä optimaalisesta.



Kuva 4.23. Liitoksen vaikuttavien voimien jakautuminen komponentteihin, a) kun lyhyen lovipinnan kaltevuus on optimaalinen, b) kun lyhyt lovipinta on vaakasuorassa, c) kun lyhyen lovipinnan kaltevuus on sama kuin liitettävien kappaleiden välinen terävä kulma $/11/$.

Figure 4.23. The forces in head notch with different angles of notch $/11/$.



Kuva 4.24. Vinokulmaisen loviliitoksen kosteuseläminen $/11/$.

Figure 4.24. The moisture deformations in head notch $/11/$.

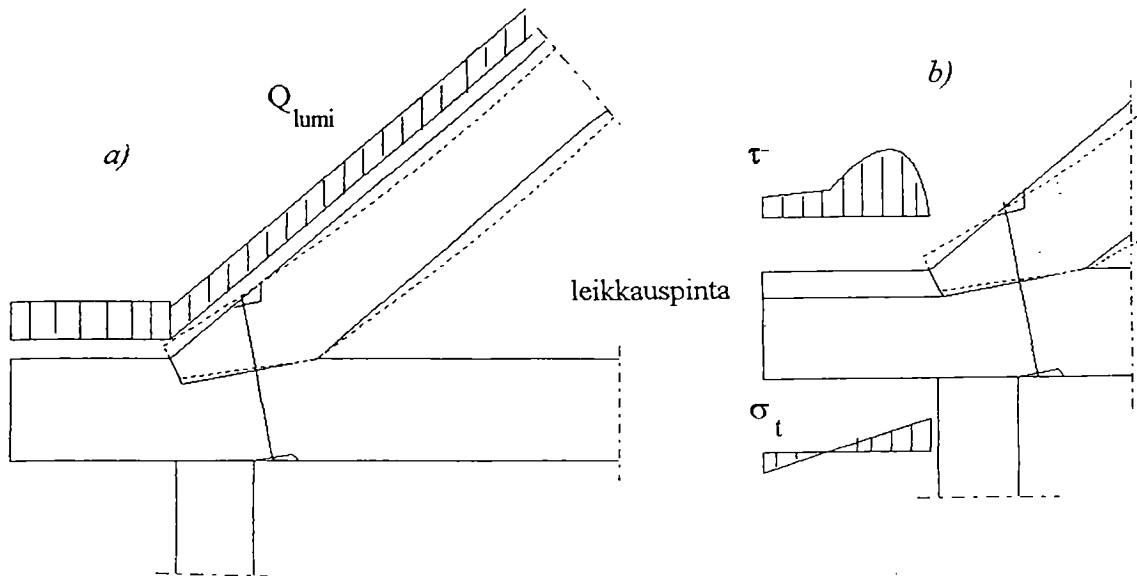
Ajan kuluessa liitettävät kappaleet liikkuvat toistensa suhteen puun kosteuselämisen takia. Kappaleet kutistuvat syitä vasten kohtisuorassa suunnassa (8...12 %) enemmän kuin syiden suunnassa (0,2...0,3 %), jolloin liitettävien kappaleiden muoto muuttuu kuvan 4.24 mukaisesti, ja puristus keskittyy pisteeseen B. Koska pisteessä A tapahtuva muodonmuutos on pieni ja lyhyeen lovipintaan vaikuttava voima suuri, palautuu lyhyen pinnan kosketus. Pitkä pinta aukeaa ja

puristus keskittyy pisteen B läheisyyteen. Yleensä voidaan olettaa, että pitkällä pinnalla kosketus säilyy lyhyen lovipinnan suuruisella alalla.

Liitoksen koossapysyminen kosteusmuodonmuutosten tapahduttua ja rakenteen asennusvaiheessa varmistetaan pultilla, joka yksipuolisessa loviliitoksessa sijoitetaan kohtisuoraan pitkää lovipintaa vasten pinnan keskipisteeseen. Pultti mitoitetaan käyttötilan kuormille, eikä sitä yleensä oteta huomioon liitoksen mitoituksessa. Liitoksen lujuutta kasvattaa liitospinnoilla vaikuttava kitka, mitä ei myöskään oteta huomioon.

Kolmioristikoita tehtäessä on puun kosteuselämisen lisäksi otettava huomioon yläpaarteen taipuman vaikutus liitoksen lujuuteen. Taipuma pienentää kapasiteettia, sillä pitkän lovipinnan ylänurkka alkaa kantamaan yläpaarretta kuvan 4.25 mukaisesti, jolloin yläpaarteen lyhyellä lovipinnalla oleva osa pyrkii liukumaan pintaa pitkin, jolloin seurauksena on, että:

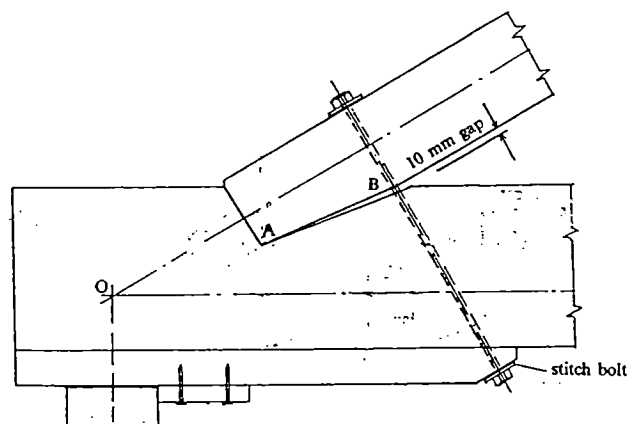
- leikkauspinnalle syntyy poikittainen vetojännitys, joka aiheutuu pinnalla vaikuttavasta kitkavoimasta. Puun poikittainen vetolujuus saattaa ylittyä.
- lyhyen lovipinnan puristus-pinta-ala pienenee yläpaarteiden päästessä liukumaan pintaa pitkin, jolloin liitoksen puristuskapasiteetti laskee ja liitoksessa tapahtuvat muodonmuutokset kasvavat puun puristuessa.
- yläpaarre pääsee lopulta luiskahtamaan paikoiltaan, mikäli loveus on matala ja loiva. Tällöin rakenne on täysin liitosta varmistaneiden pulttien varassa.



Kuva 4.25. a) Yläpaarteiden taipuman vaikutus liitoksen toimintaan sekä b) leikkauspinnalle syntyvät jännitysjaakaumat: leikkausjännitys ja poikittainen vetojännitys.

Figure 4.25. a) The effect of deformations in jointed beam to the head notch.

Liittyvien kappaleiden taipumat on otettava huomioon loviliitoksen suunnittelussa. Liitoksen päästessä kuivumaan on pitkän lovipinnan noin 1...2 mm:n aukeamisesta hyötyä, sillä pieni taipuma pääsee tapahtumaan ongelmitta. Yleensä yläpaarteelle on järjestettävä taipumavara tekemällä pitkän lovipinnan yläosa alapaarteessa loivemmaksi kuin vastakappale. Kun pitkän lovipinnan ylänurkassa on noin 10 mm:n rako kuvan 4.26 mukaisesti, voi taipuma tapahtua rakenteen vaurioitumatta /15/.



Kuva 4.26. Vinokulmisen loviliitoksen valmistus niin, että yläpaarre voi taipua rakenteen vaurioitumatta /15/.

Figure 4.26. A gap gives the beam a possibility to deformate without causing transversal tension to the notch.

Vinokulmaisen loviliitoksen mitoituksessa tarkistetaan lovisyvyys t , ja leikkauspituus l_v , jotka määräytyvät lyhyellä lovipinnalla vaikuttavan voimakomponentin N mukaan. Liitokseen vaikuttava sauvavoima S jaetaan komponentteihin kuvan 4.27 mukaisesti, jolloin lyhyttä puristus pintaa vasten vaikuttava voimakomponentti N on optimitapauksessa (12)

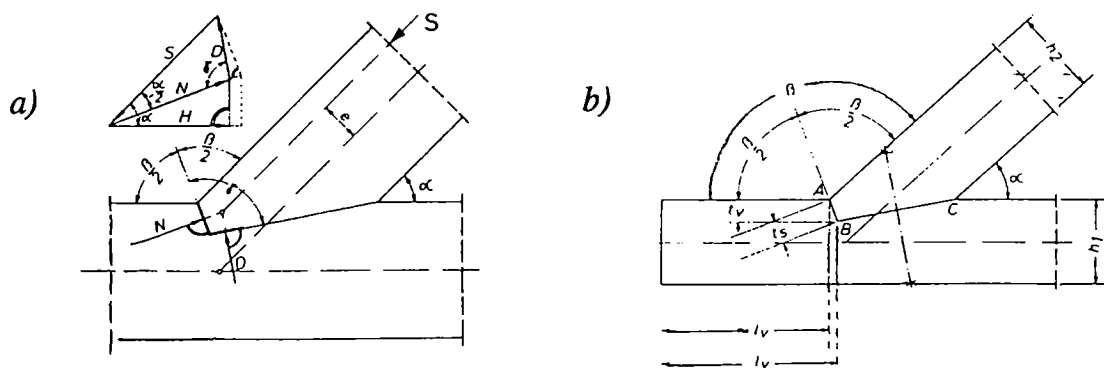
$$N = S \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \quad (12)$$

Vastaavasti pitkää pintaa vasten vaikuttava voimakomponentti D (13)

$$D = S \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \quad (13)$$

ja lovetavassa kappaleessa syiden suuntaan vaikuttava voimakomponentti H (14)

$$H = N \cdot \cos \frac{\alpha}{2} = S \cdot \cos^2 \frac{\alpha}{2} \quad (14)$$



Kuva 4.27. Voiman jako komponentteihin ja mitoituksessa käytettävät merkinnät /11/.
Figure 4.27. The force components in head notch connection /11/.

Mitoitus aloitetaan laskemalla vaadittava lyhyen puristus pinnan pituus t_v , jonka laskenta-kaavat (15)-(17) riippuvat pienen puristus pinnan kaltevuudesta ϕ

$$a) \quad t_{s1} = \frac{N_1}{b \cdot f_{c,\alpha/2}} = \frac{S \cdot \cos \frac{\alpha}{2}}{b \cdot f_{c,\alpha/2}} \quad , \quad \phi = \frac{\alpha}{2} \quad (15)$$

$$b) \quad t_{s2} = \frac{N_2}{b \cdot f_{c,\alpha}} = \frac{S \cdot \cos \alpha}{b \cdot f_{c,\alpha}} \quad , \quad \phi = 0^\circ \quad (16)$$

$$c) \quad t_{s3} = \frac{N_3}{b \cdot f_{c,\alpha}} = \frac{S}{b \cdot f_{c,\alpha}} \quad , \quad \phi = \alpha \quad (17)$$

Lyhyen pinnan sallittu puristuslujuus $f_{c,\alpha} f_{c,\alpha/2}$ lasketaan Hankinsonin kaavalla (18) ja sen arvona käytetään pienempää ylä- tai alapaarteen puristuslujuuksista

$$f_{c,\alpha} = \frac{f_c \cdot f_{c,l}}{f_c \cdot \sin^2 \alpha + f_{c,l} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (18)$$

Pitkällä lovipinnalla vaikuttava puristusjännitys lasketaan voimakomponentin D perusteella käyttäen puristuspinna alana lyhyen pinnan alaa.

Puristuslujuus lasketaan Hankinsonin kaavalla. Pitkän pinnan puristus voi tulla mitoitettavaksi tapauksessa, jossa lyhyen lovipinnan kaltevuus $\phi < \frac{\alpha}{2}$ ja pitkällä lovipinnalla vaikuttava voima on suurimmillaan.

Lovettavan kappaleen kapasiteetti liitoskohdassa alenee loveuksen takia. Lovisyvyys t_v lasketaan pienen lovipinnan pituuden avulla kaavoilla (19) - (21)

$$\text{a) } t_{v1} = t_{s1} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} = \frac{S \cdot \cos^2 \frac{\alpha}{2}}{b \cdot f_{c,\alpha/2}} \quad (19)$$

$$\text{b) } t_{v2} = t_{s2} = \frac{S \cdot \cos \alpha}{b \cdot f_{c,\alpha}} \quad (20)$$

$$\text{c) } t_{v3} = t_{s3} \cdot \cos \alpha = \frac{S \cdot \cos \alpha}{b \cdot f_{c,\alpha}} = t_{v2} \quad (21)$$

Lovisyvyksiä vertailtaessa voidaan todeta, että $t_{v1} < t_{v2} = t_{v3}$, jolloin lovettavan kappaleen kannalta pienen lovipinnan kaltevuus $\phi = \frac{\alpha}{2}$ on edullisin. Tällöin lovettavan kappaleen poikkileikkaus heikkenee vähiten. Vinokulmaisen loviliitoksen käyttö rajautuu välille $20^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$, jotta lovisyvyys ei muodostu liian suureksi. Lovisyvyyttä on rajoitettu lovettavan kappaleen korkeudesta riippuen

$$\alpha \leq 50^\circ \rightarrow t_v \leq \frac{h}{4} \quad \text{ja} \quad \alpha \geq 60^\circ \rightarrow t_v \leq \frac{h}{6}$$

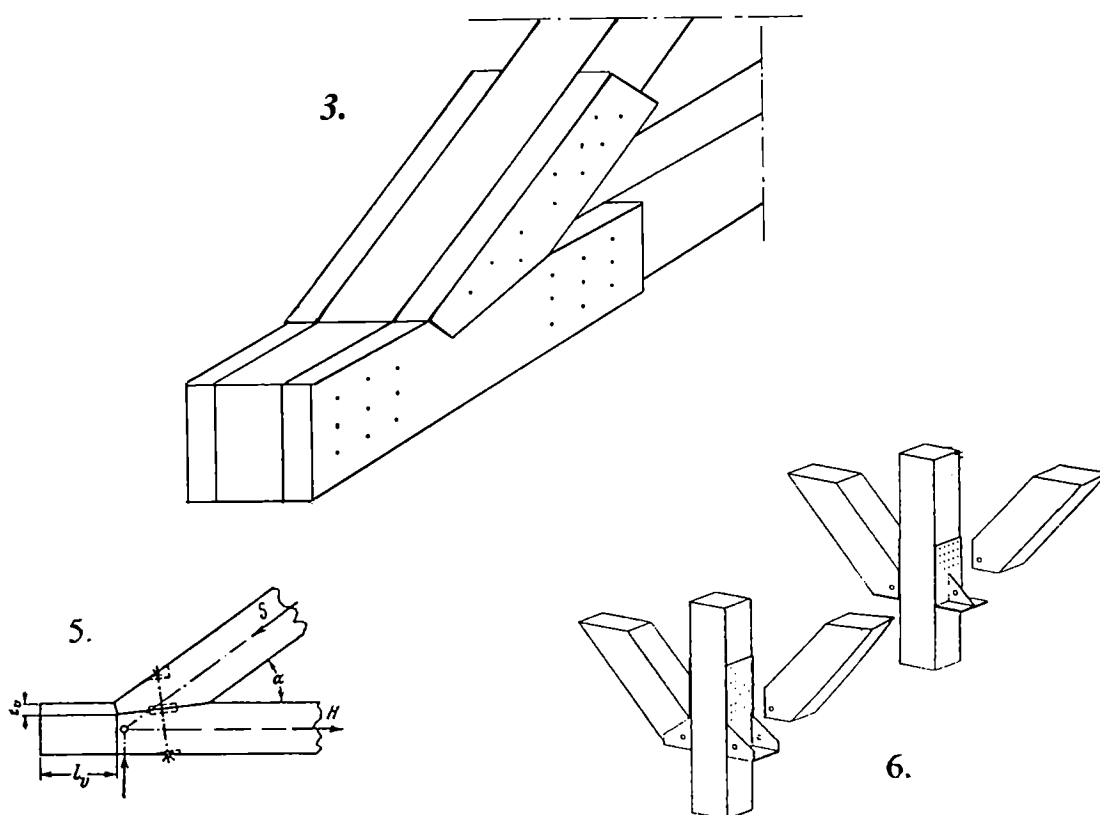
Välillä $50^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ sallitut lovisyvydet voidaan laskea lineaarisesti väliltä $\frac{h}{6} \leq t_v \leq \frac{h}{4}$.

Mikäli loveus tehdään kappaleen molemmin puolin, saa lovisyvyys olla korkeintaan $t_v \leq \frac{h}{6}$

kulmasta α riippumatta. Lovisyvyuden rajoittamisella pyritään varmistamaan myös, että leikkauspinta ei ole sahatavaran eniten halkeilevassa keskikolmanneksessa, sillä leikkauspinnan leikkauslujuus pienenee pinnalla olevien halkamien takia.

Jos vaadittava lovisyvyys t , on suurempi kuin sallittu, voidaan liitos toteuttaa tietyin edellytyksin:

1. Suurennetaan lovetettavan kappaleen korkeutta h .
2. Tehdään loviliitokseen useampi puristuspuoli kuvan 4.22 e) mukaisesti.
3. Levennetään liitettäviä kappaleita molemmille sivuille kiinnitettävillä sivupuilla tai vanerilevyillä. Jotta sivukappaleet alkavat toimia liitoksessa, vaaditaan melko suuret muodonmuutokset, ja puu saattaa plastisoitua loveuksen kohdalta.
4. Kiinnitetään lovettavaan kappaleeseen loveuksen alapuolelle klossi, joka toimii lovipinnan jatkeena ja joka mitoitetaan siirtämään voimat lovettavalle kappaleelle.
5. Lisätään liitoksen kantokykyä pitkälle sivulle asennettavilla vaarnoilla.
6. Tehdään liitos erityisten metallikenkien avulla (kuva 4.28).

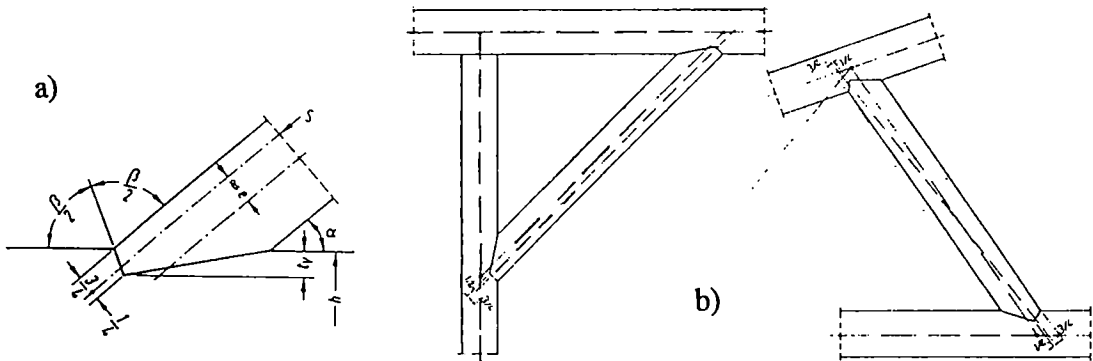


Kuva 4.28. Vinokulmaisen loviliitoksen vahvistamisessa käytettäviä menetelmiä.
Figure 4.28. Some methods for strengthening the head notch joint.

Tapauksissa 1-6 liitos mitoitetaan perinteiseen tapaan. Liittyvän osan mitoituksessa on otettava huomioon sauvavoiman epäkeskisyydestä e aiheutuva lisämometti (22)

$$e = \frac{h}{2} - \frac{3}{4} \cdot t_s \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \quad (22)$$

Voiman epäkeskisyys aiheutuu siitä, että sauvavoiman S vaikutussuora eroaa sauvan keskiakselista kulkien kuvan 4.29 a) mukaisesti lyhyen lovipinnan neljännespisteen kautta loven kärjestä katsottuna. Epäkeskisyyden arvo koko sauvan pituudella riippuu myös sauvan toisen pään liitoksesta kuvan 4.29 b) mukaisesti. Epäkeskisyyden vaikutus saattaa kumoutua sauvan keskellä, mikäli kappaleiden vastakkaisten päiden tukipisteet sijaitsevat kappaleen keskiakseliin nähden eripuolilla.



Kuva 4.29. a) Sauvavoiman vaikutussuoran sijainti ja b) sauvaan syntyvä epäkeskisyys /11/.
Figure 4.29. a) The force location b) the eccentricity in the beam /11/.

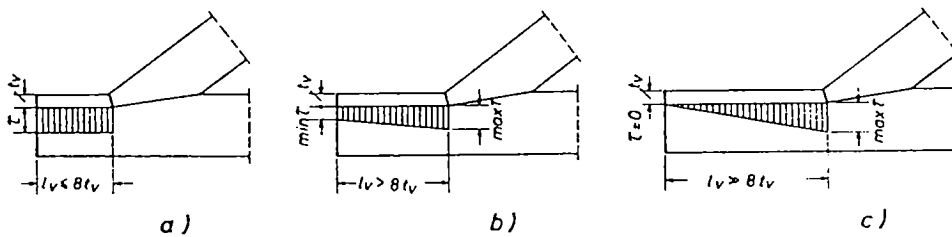
Puun epähomogeenisuuden, erilaisten valmistusvikojen sekä lovivaikutuksen takia ei lovipinnoilla vaikuttava puristusjännitys ole tasainen. Kun lisäksi liitettävissä kappaleissa on alkuepäkeskisyttä ja -kieroutta, vaikuttaa rakenteeseen voima myös rakenteen tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Tämän voiman oletetaan olevan 2 % liitettäviin kappaleisiin vaikuttavasta kuormasta, ja se on otettava huomioon rakenteen sivutuenta ja nurjahdustukia suunniteltaessa. Puun epähomogeenisuuden ja valmistusvirheiden vaikutusta liitoksen voiman siirrossa voidaan vähentää käyttämällä lyhyellä lovipinnalla puristusta tasaavaa ohutta levyä, joka on metallia tai kovaa puuta, kuten koivua tai vaneria.

Liitoksen leikkauslujuuteen vaikuttaa lovetavan kappaleen pituus liitoksen jälkeen. Tämä leikkauspituus l_v lasketaan lovetavassa kappaleessa vaikuttavan voiman H ja puun leikkauslujuuden perusteella kaavalla (23)

$$l_v = \frac{H}{f_v \cdot b} \quad (23)$$

Leikkauspituuden tulee olla vähintään 200...250 mm, jotta leikkausala ei heikkene liikaa päätypuun kuivumishalkeamien takia. Leikkauspituutta laskettaessa on otettava huomioon, että leikkausvoima ei jakaudu tasaisesti leikkauspinnalle, vaan loveuksen kärkeen syntyy jännityshuippu. Jännityshuippu kasvaa kuvan 4.30 mukaisesti leikkauspituuden kasvaessa, jolloin tietyn raja-arvon jälkeen leikkauspituuden kasvattaminen ei lisää liitoksen lujuutta.

Mikäli leikkauspinta on lyhyt, voidaan leikkausjännityksen yleensä olettaa jakautuvan tasaisesti koko leikkauspinnalle. Kun todellinen leikkauspituus ylittää arvon $8t_v$, ei leikkausjännitys enää jakaudu tasaisesti, vaan jännitys on suurimmillaan loveuksen kohdalla-pieneten kohti arvoa nolla kaukana loveuksesta.



Kuva 4.30. Leikkausjännityksen jakautuminen leikkauspituuden mukaan /10/.
Figure 4.30. The distribution of shear stresses as a function of the shear length /10/.

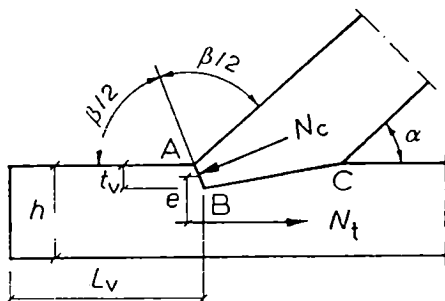
Loveuksen kohdalle syntyvää jännityshuippua voidaan pienentää pyöristämällä loveuksen kärkeä poralla. Laskelmissa loveuksen kärkeen syntyvän jännityshuipun vaikutus otetaan huomioon redusoimalla leikkauslujuutta f_v , jolloin laskettua leikkausjännityksen arvoa verrataan redusoituun arvoon kaavan (24) mukaisesti. Kaavoissa käytetyt merkinnät selviävät kuvasta 4.31.

$$\tau = \frac{H}{l_v \cdot b} \leq \frac{f_v}{1 + \frac{\beta l_v}{e}} \quad (24)$$

$$e = \frac{h - t_v}{2} + \frac{t_v}{2} = \frac{h}{2} \quad (25)$$

jossa l_v on leikkautuvan osan pituus. Leikkauskapasiteettia laskettaessa täytyy l_v :n olla välillä $3e \leq l_v \leq 10t_v$.

β on kerroin, joka toispuoleisessa leikkauksessa kuten loviliitoksessa on 0,25. Molemmipuoleisessa leikkauksessa kuten puuvaarnassa, kerroin on 0,125.



Kuva 4.31. Vinokulmaisen loviliitoksen merkinnät /10/.

Figure 4.31. The symbols in head notch. /10/.

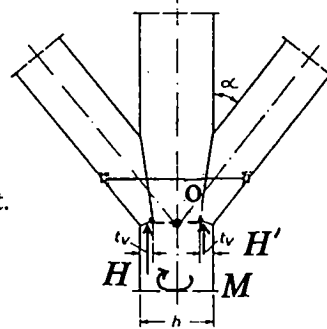
Mitoituksen lopuksi tulee tarkistaa kappaleeseen syntyvät jännitykset loveuksen kärjen kohdalla. Tarkastelu suoritetaan epäedullisimmassa kuormitustapauksessa, jolloin ulkoisista kuormista johtuen kappaleeseen vaikuttaa suurin momentti M . Tähän arvoon lisätään sisäisestä voimansiirrosta aiheutuva momentti, jolloin saadaan kuvan 4.32 perusteella

$$M_o = (H - H') \left(\frac{h}{2} + \frac{t_v}{2} \right) + M \quad (26)$$

Mitoitusehtona loveuksen kohdalla käytetään syntyvää taivutusvetojännitystä, jonka tulee olla pienempi kuin lujuus syiden suunnassa.

$$\sigma_b = \frac{M_o}{W} \leq f_b \quad (27)$$

$$= \frac{1}{6}bh'^2 \quad (28)$$



Kuva 4.32. Loveuksen kohdalla vaikuttavat voimat.

Figure 4.32. The forces in the notch.

4.2.1.1 Vinokulmaisen loviliitoksen plastinen mitoitus vitaposkirakenteessa

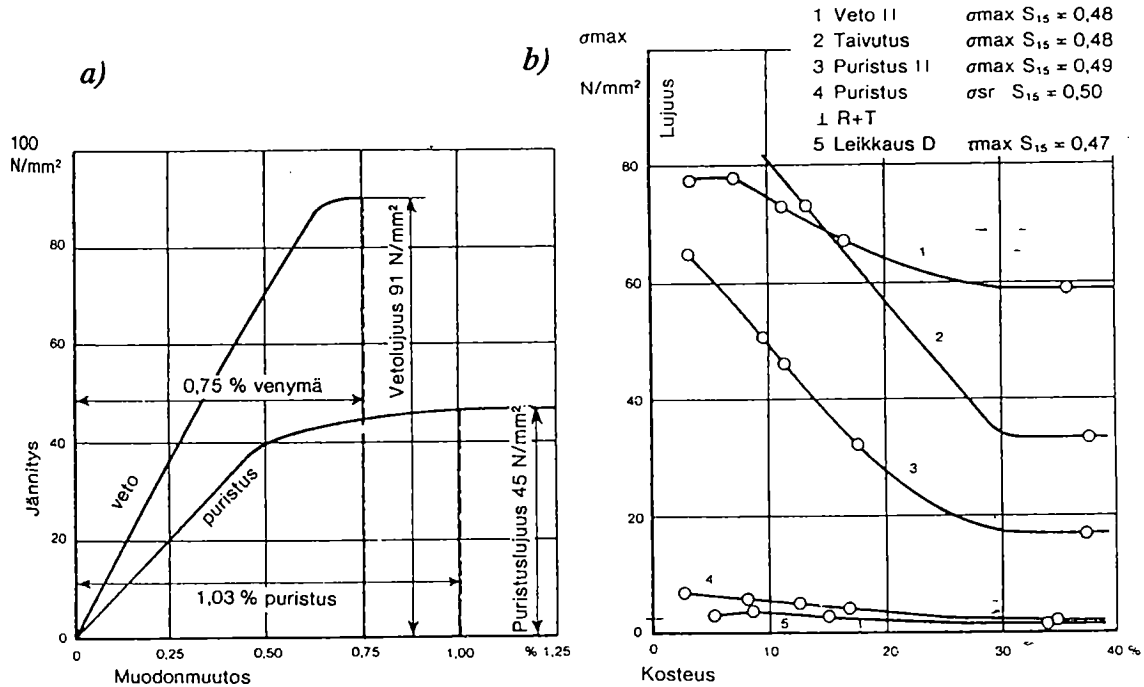
Koska lovisyvyydelle asetetut rajoitukset johtavat perinteisessä mitoituksessa usein liitettävien osien poikkileikkausmittojen kasvattamiseen, on rakenne mahdollista optimoida plastisen mitoituksen avulla. Rakenteen rasituskuviota laskettaessa otetaan huomioon vitaposkien kohdalle pilariin syntyvä plastinen nivel. Plastista niveltä voidaan approksimoida tietokoneella laskettaessa pienentämällä pilarin poikkileikkauksen alaa loveuksien kohdalla olevassa elementissä. Tällöin laskentatulokset lähenevät todellista niveltä. Poikkileikkauksessa vaikuttava momentti aiheutuu lähinnä rakenteen sisäisestä voimien siirrosta. Plastinen mitoitus soveltuu vitaposkirakenteisiin, joissa loviliitos tehdään pilarin molemmille puolille. Tällöin sallitaan loveuksien välillä syntyvät muodonmuutokset.

Plastisen mitoituksen hyväksikäytön edellytyksenä on, että rakennuksen jäykistykseen ei käytetä vitaposkirakennetta. Tämä toteutuu, kun kantavin seinin toteutetun rakennuksen välipohjien kannatukseen käytetään vitaposkirakennetta tai, kun vitaposkilinjan jäykistys hoidetaan päätyihin sijoitetuilla järeillä vinotuilla.

Plastisen mitoituksen yhteydessä ei oteta huomioon lovisyvyyden rajoituksia. Loveusta ei kuitenkaan tulisi tehdä syvemmälle kuin $1/3h$, jottei puun halkeilu heikennä liitoksen leikkaukskapasiteettia. Loveuksen kohdalla vaikuttavat voimat ja taivutusmomentti lasketaan kuten edellä kappaleessa 4.2.1.

Kuvassa 4.33 esitetty virheettömän puun vetomurtolujuus on noin kaksi kertaa suurempi kuin puristumurtolujuus. Vaikka lisäksi kimmomodulit vedossa ja puristuksessa ovat lähes yhtä suuret, on murtopuristuma noin 20...30 % suurempi kuin murtovenymä.

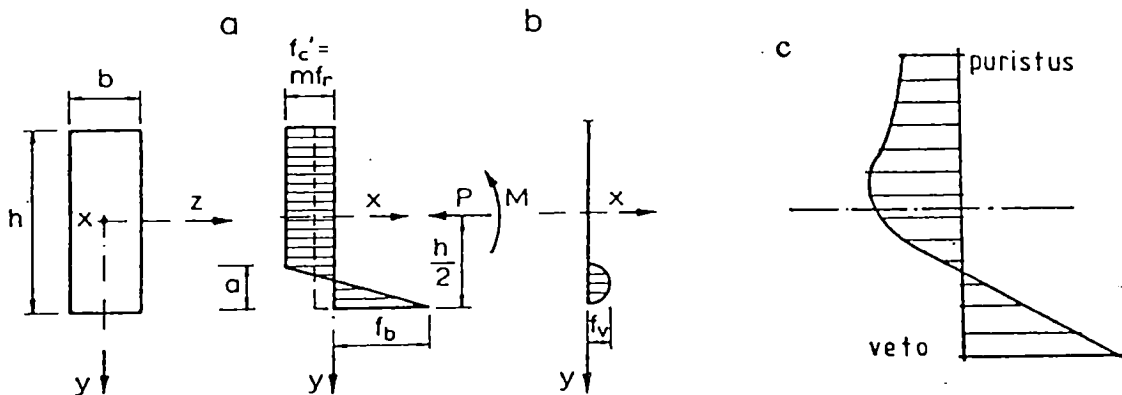
Taivutetun puurakenteen jännitysten voidaan olettaa jakautuvan lineaarisesti, kunnes saavutetaan jännitys, joka on noin 70...100 % murtopuristuslujuudesta. Tällöin puu alkaa plastisoitua, ja puristuspuolelle syntyvät ensimmäiset mikromurtumat. Mikromurtumien muodostumisen jälkeen muodonmuutokset kasvavat nopeasti, vaikka jännitys puristuspuolella ei enää nouse. Koska vetomurtolujuus on puristumurtolujuutta suurempi, niin



Kuva 4.33. a) Esimerkki virheettömän puun veto- ja puristusdiagrammista. b) Männyn lujuusominaisuuksien muuttuminen kosteuden funktiona /16/.

Figure 4.33. a) Stress and strain diagram under tension and compression. b) The strength in relation to moisture content of wood /16/.

puristuspuolen plastisoitumisen alkuvaiheessa vetomurtolujuutta ei vielä saavuteta. Puun jännitysvenymäkäyrä on siis epälineaarinen puristetulla osalla ja lineaarinen vedetyllä osalla aina murtoon asti. Murtotilanteessa poikkileikkauksen neutraaliakseli siirtyy vetoreunaa kohti ja murto tapahtuu lopulta hauraasti vetojännitysten ylittyessä /17/. Kuvassa 4.34 on esitetty pilarin jännitysjakautumat.



Kuva 4.34. Pilarin poikkileikkauksen yksinkertaistettu jännitysjakautuma a) taivutusmomentista, b) leikkausvoimasta /10/ ja c) jännitysjakautuma murtotilanteessa /17/.

Figure 4.34. The stress distribution in the beam a) for bending moment, b) for shear force /10/ and c) the stress distribution in ultimate state.

Tutkittaessa taivutettua, plastisoitunutta poikkileikkausta, jonka puristuspuolen syyt ovat osittain nurjahtaneet, voidaan muun osan poikkileikkausta todeta toimivan lineaarisen kimmoteorian mukaisesti. Suorakaidepoikkileikkaukselle voidaan tasapainoehdoista ($P=0$) johtaa edellä olevan kuvan merkintöjä käyttäen taivutusmomenttikapasiteetti (29), jolla ei vielä ole vaaraa pilarin hauraasta vetomurrosta

$$M_v = \phi \cdot F'_c \cdot W_e \quad (29)$$

missä
$$\phi = 3 - \frac{4(1-t)^2}{n+1} - 3t \quad (30)$$

$$t = \frac{P}{b \cdot h \cdot F'_c} \quad (31)$$

$$n = \frac{f_b}{f'_c} \quad (32)$$

$$F'_c = m \cdot f_c \approx 0,8 f_c \quad (33)$$

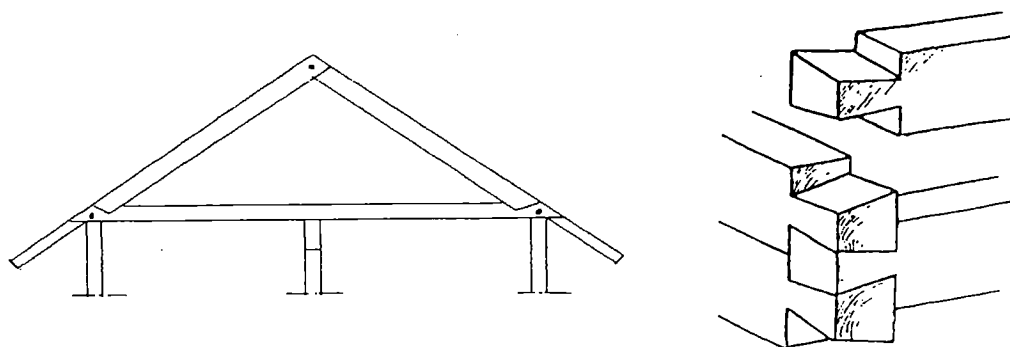
$$W_e = \frac{1}{6} b \cdot h^2 \quad (34)$$

Liitoksen kohdalla vaikuttavan taivutusmomentin tulee olla pienempi kuin kaavalla (29) laskettu plastinen momenttikapasiteetti poikkileikkauksessa. Mikäli näin ei ole, täytyy pilarin poikkileikkausta kasvattaa.

Koska kosteus vaikuttaa enemmän puun puristus- kuin vetolujuuteen, on puun plastisoituminen yleisempää kosteissa olosuhteissa. Aina kun puun plastisoituminen otetaan huomioon rakenteen mitoituksessa, on rakenteen stabiliteetti tarkistettava. Puristuspuolen plastisoitumisesta seuraa huomattavia muodonmuutoksia ja rakenteen jäykkyys alenee, jolloin myös rakenteen siirtymätila on tarkistettava, ettei poikkileikkauksen kiertymäkapasiteettia ylitetä. Kaksipuoliset vitaposkirakenteet ovat kiertymisen kannalta edullisia, sillä molemminpuoliset vitaposket estävät pilarin liiallisen kiertymisen. Vitaposkien paikoilla pysyminen plastisoitumisen tapahduttua on varmistettava pultilla.

4.2.2 Lohenpyrstöliitos

Vinokulmaisen loviliitoksen tapaan myös lohenpyrstöliitoksessa voimat siirtyvät liitettävältä kappaleelta toiselle puristuksella kontaktipinnoissa. Lohenpyrstöliitos on perinteisesti kattotuoleissa käytetty liitos, jonka avulla myös välipohjajvasoja on liitetty hirsiseiniin sekä tehty hirsiseiniin nurkkaliitoksia (kuva 4.35). Lohenpyrstöliitoksia käytettäessä suurimman ongelman muodostaa järeän sahatavaran kosteuseläminen, jolloin puristuspuolella pyrkii pienenemään ja liitoksen siirtymät kasvamaan. Myös lohenpyrstön valmistustekniikka on puutteellinen. Tämän takia lohenpyrstöliitoksen käyttö on nykyään melko harvinaista. Kosteusmuodonmuutosten aiheuttamia ongelmia voidaan vähentää käyttämällä mahdollisimman lähellä lopullista rakenteen tasapainokosteutta olevaa puutavaraa. Ulkonäöltään liitos on kaunis.



Kuva 4.35. Lohenpyrstöliitoksin tehtyjä rakenteita.
Figure 4.35. The notch joint in tension member

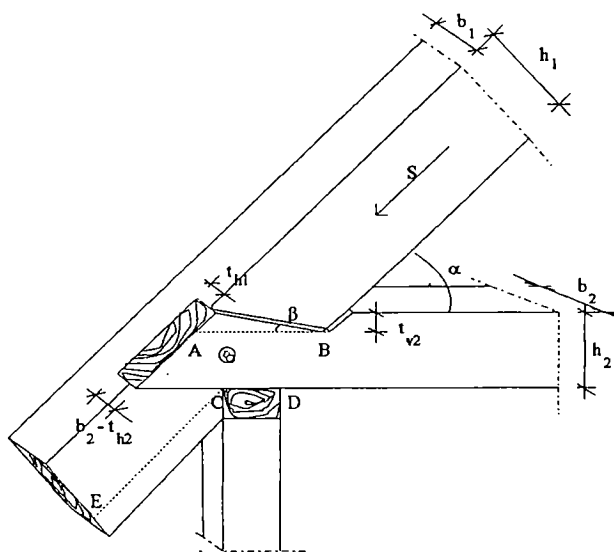
Liitettävien osien loveaminen heikentää huomattavasti niiden kapasiteettia, jolloin lovisyvyyttä on rajoitettu sekä vaaka- että pystysuunnassa. Liitoksen jälkeen jatkuvaa puuta, puristussauvaa, voidaan loveta korkeintaan $1/3$ sen paksuudesta

$$t_{h1} \leq \frac{1}{3} \cdot b_1$$

Liitokseen päätyvää puuta, vetosauvaa, voidaan loveta puolet paksuudesta ja $1/3$ korkeudesta

$$t_{h2} \leq \frac{1}{2} \cdot b_2, \quad t_{v2} \leq \frac{1}{3} \cdot h_2 \quad /18/.$$

Liitoksen kantokyky riippuu liitettävien kappaleiden välisestä kulmasta α ja lohenpyrstön kaltevuudesta β . Koska lohenpyrstön kaltevuus on loveusrajoituksista johtuen pieni, voidaan liitoksen käyttökelpoisuuteen vaikuttaa lähinnä kappaleiden välisen kulman suuruudella, jonka tulee olla $\alpha \geq 30^\circ$. Liitettävien kappaleiden loveamisessa tulee olla tarkka, jotta kappaleet sopivat tiukasti yhteen. Käytetyt merkinnät selviävät kuvasta 4.36.



Kuva 4.36. Lohenpyrstöliitos ja jatkossa käytettävät merkinnät.

Figure 4.36. The notch joint in a tension member and the symbols.

Lohenpyrstöliitoksilla koottu kolmioristikko tuetaan ulkoseinillä yläpaarteeseen tehtyjen loveuksien kohdalta, jolloin tukipinnan puristuslujuus on suurempi kuin tuettaessa rakenne alapaarteeseen. Tuen lovi tehdään kuvan 4.36 mukaisesti. Yläpaarretta voidaan loveta vain tukipinnan vaatima pituus C-D tai lisäksi koko matkalta C-E. Loveusta C-D ei tule tehdä pidemmäksi kuin $1/4$ ylä-

paarteen korkeudesta, jotta lohenpyrstön alapuolinen puristuspinna ei pienene liikaa. Rästäs toimii liitoksessa lohenpyrstöä kiilaavana osana, jolloin myös siihen kohdistuu puristusta ja leikkausta.

Kuivumisen seurauksena puut kutistuvat ja vääntyvät, jolloin liitoksen puristuspinna pienenee. Liitos pysyy kutistumisesta huolimatta tiukkana, sillä se kiristyy kiilavaikutuksen ansiosta itsestään. Puristus- ja leikkauspinnan lyheneminen voidaan ehkäistä tekemällä lohenpyrstö rakennusvaiheessa niin pitkäksi, että kutistumisen ja liitoksen kiristymisen jälkeen toimiva puristuspinna on vielä täysipituinen. Lisäksi puut on liitettävä toisiinsa siten, että tapahtuvat muodonmuutokset eivät kavenna puristuspinnaa. Liittimet vähentävät myös puristuspinnan pienenemistä. Kuvassa 4.37 on esitetty kosteusmuodonmuutosten kannalta oikein tehty lohenpyrstöliitos.

Lohenpyrstö tehdään säteen suuntaisen kutistuman dy aiheuttaman liukumun dx verran suunniteltua pidemmäksi: (dy) :
 $dy = \beta_R \cdot \Delta u \cdot h_2$

$$dx = \frac{dy}{\tan \beta}$$

missä β_R on puun kutistumiskerroin kosteusprosentin Δu muutosta kohden.

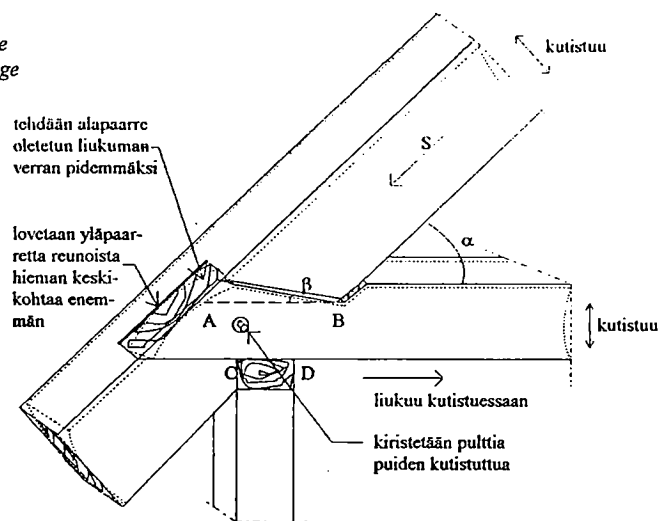
Kun $h_2 = 200$ mm ja puun kosteusmuuttuu 20 %:sta 12 %:iin, on $dy = 0,64$ mm ja $dx = 2...4$ mm.

The tail is made as much longer as it slides length wise (dx) due to its radial shrinkage (dy):
 $dy = \beta_R \cdot \Delta u \cdot h_2$

$$dx = \frac{dy}{\tan \beta}$$

where β_R is the shrinkage coefficient of the wood per change of the moisture content Δu .

When $h_2 = 200$ mm and the moisture changes from 20% to 12%, dy is 0.64 mm and dx is 2 - 4 mm.



Kuva 4.37. Itsekiristynvä lohenpyrstöliitos sydänkeskeisen välipohjapalkin ja ei-sydän-keskeisen yläpaarteen välillä sekä liitoksessa syntyvät kosteusmuodonmuutokset.

Figure 4.37. The moisture deformations in a tension notched joint.

Liitoksen koossa pysyminen sekä kosteusmuodonmuutosten tapahduttua että rakenteen asennusvaiheessa varmistetaan vähintään neljällä naulalla tai yhdellä pultilla. Pultti vastustaa nauvoja paremmin puun kuivumisen ja vääntymisen aiheuttamaa liitettävien kappaleiden irtoamista toisistaan. Mikäli lohenpyrstöliitoksin koottu kattotuoli on lämmittämättömässä ullakkotilassa, ovat liitettävissä puissa tapahtuvat kosteusmuodonmuutokset kausittaisesti kutistumista tai turpoamista. Kesällä, kun puut kuivuvat ja kutistuvat, katolta tulevat kuormat ovat pienet. Talvella, kun katolla on suuri lumikuorma ja liitettävien puiden kosteus on korkeampi, voidaan liitoksen olettaa kiristyvän. Liittimet mitoitetaan käyttötilan kuormille tai sille osalle kuormista, joka kannetaan liittimillä. Liittimet tulee sijoittaa siten, että leikkauspinta A-B jää ehjäksi.

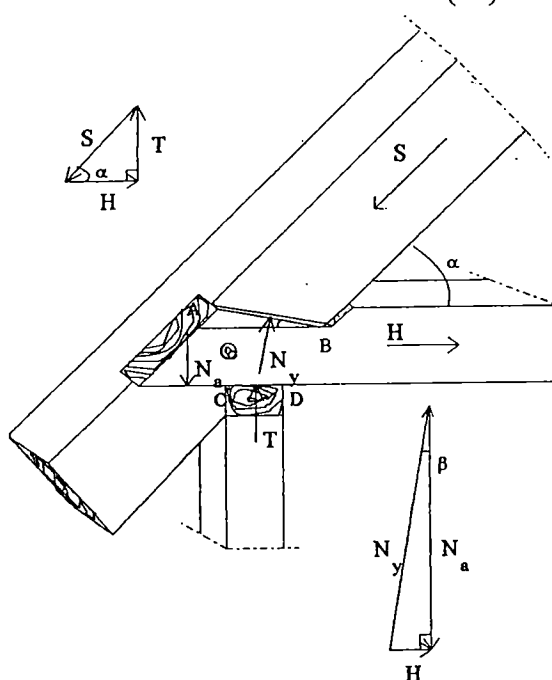
Lohenpyrstöliitoksen mitoituksessa tarkistetaan lovipinnoilla syntyvät puristusjännitykset sekä liitokseen päättyvän kappaleen leikkausjännitys pinnalla A-B. Liitokseen vaikuttava voima S jaetaan kuvan 4.38 mukaisesti tukireaktioon T (35) ja vaakasuuntaiseen komponenttiin H (36). Alapaarteeseen vaikuttava vetovoima H jaetaan vielä puristuspintoja vastaan kohtisuoriin komponentteihin N_y ja N_a (37)-(38).

$$T = S \cdot \sin \alpha \quad (35)$$

$$H = S \cdot \cos \alpha \quad (36)$$

$$N_a = H \cdot \tan(90^\circ - \beta) \quad (37)$$

$$N_y = \frac{H}{\cos(90^\circ - \beta)} = \frac{H}{\sin \beta} \quad (38)$$



Kuva 4.38. Voimien jakautuminen lohenpyrstöliitoksessa.

Figure 4.38. The force distribution in a tension notched joint.

Mitoitus aloitetaan valitsemalla loveuksien mitat. Lohenpyrstö tehdään mahdollisimman jyrkäksi, jotta lovipintojen puristusjännitykset saadaan pienemmiksi. Puristuspintojen A_c ja leikkauspinnan A_v alat lasketaan kaavoilla (39) - (41)

$$A_{cy} = t_{h1} \cdot \frac{h_1}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (39)$$

$$A_{ca} = t_{h1} \cdot \frac{\frac{3}{4} h_1}{\sin \alpha} \quad (40)$$

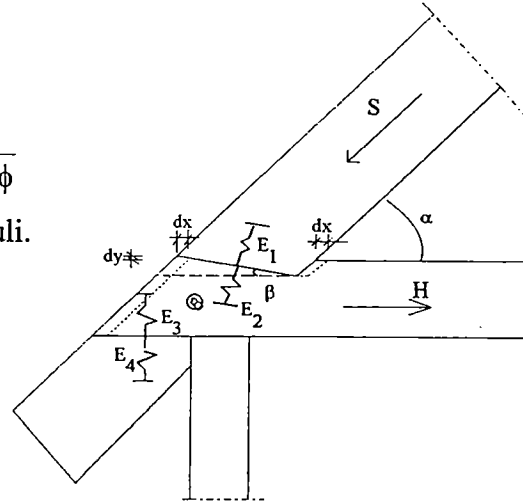
$$A_v = t_{h2} \cdot \frac{h_1}{\sin \alpha} \quad (41)$$

Liitettävien kappaleiden jännitykset tarkistetaan molemmilla puristuspinnoilla sekä leikkauspinnalla. Puristusjännitysten suuruus riippuu liitoksessa tapahtuvista siirtymistä. Liitoksessa sallitaan vaakasiirtymä $dx = 5$ mm, jonka aiheuttama alapaarteen puristuma saadaan kuvan 4.39 avulla.

$$dy = dx \cdot \tan\beta$$

$$E_{\phi} = \frac{E_{\parallel} \cdot E_{\perp}}{E_{\parallel} \sin^3 \phi + E_{\perp} \cos^3 \phi}$$

missä E on kimmomoduli.



Kuva 4.39. Liitoksessa tapahtuvat siirtymät.
Figure 4.39. The deformations in the joint.

Puristuman oletetaan tapahtuvan vasta, kun pinnalla vaikuttava jännitys on puristuslujuutta suurempi, jolloin voidaan laskea voimakomponentin N_{ϕ} suurin sallittu arvo kaavalla (44)

$$\sigma_{\phi}' = \varepsilon \cdot E_{\phi} = \frac{1}{2} \frac{dy}{h_2} \cdot E_{\phi} \quad (42)$$

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{\phi}' + f_{c\phi} \quad (43)$$

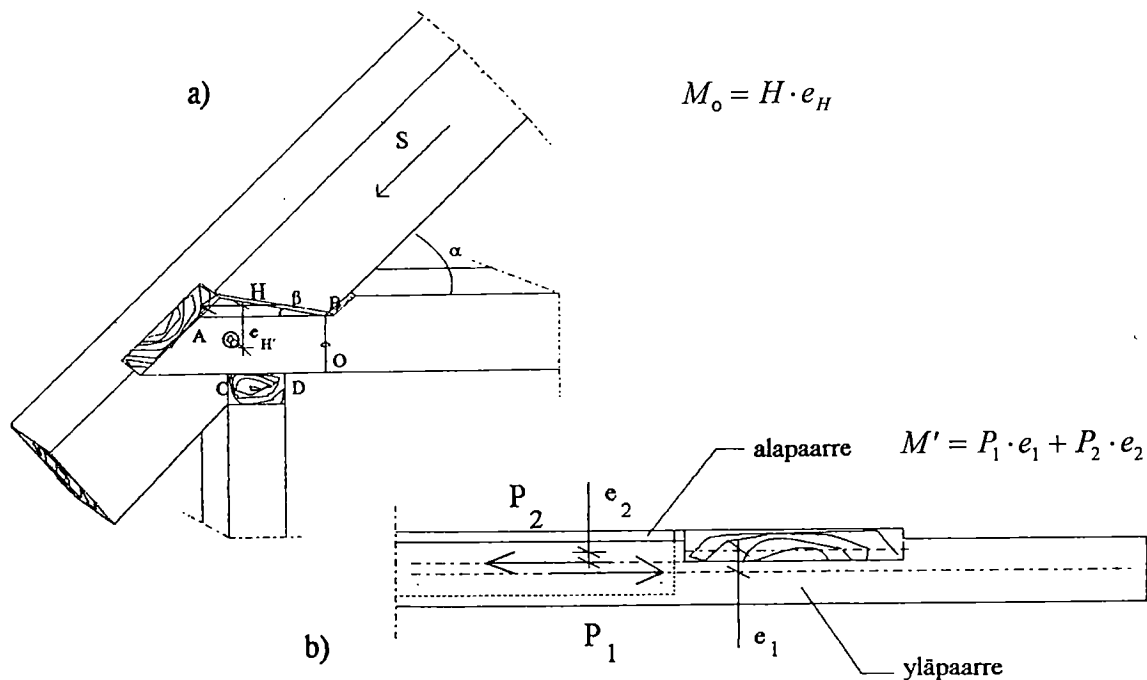
$$N_{\phi, sall} = \sigma_{\phi} \cdot A_c \quad (44)$$

Lohenpyrstön alapinnassa puristuslujuus on yhtä suuri kuin puun syitä vastaan kohtisuora puristuslujuus, ja yläpinnassa puristuslujuus lasketaan Hankinsonin kaavalla (18). Mikäli $N_{\phi, sall}$ on pienempi kuin liitokseen vaikuttava voima N_{ϕ} , suurennetaan liitoksen lovisyvyyksiä tai mitoitetään liittimet kantamaan osa voimista. Käytännössä liitoksen lujuutta kasvattaa liitospinnoilla vaikuttava kitka, joka pienentää liitoksessa tapahtuvia siirtymiä.

Vaikka yleensä lovipinnoilla vaikuttava puristus on liitoksen mitoittava tekijä, tarkistetaan leikkausjännitys pinnalla A-B. Leikkauslujuutta ei tarvitse redusoida leikkauspituuden kasvaessa, sillä liitoksen leikkauskapasiteettia kasvattaa leikkauspinnalla A-B vaikuttava puristus, joka nostaa leikkauslujuuden arvoa 15...20 %

$$\tau = \frac{H}{A_v} \leq f_v \quad (45)$$

Liitoksen voimansiirtotavasta johtuen syntyy ala- ja yläpaarteisiin epäkeskisyyttä, joka on otettava huomioon mitoituksessa. Sisäisestä voimien siirrosta aiheutuu alapaarteeseen loveuksen kärjen kohdalle momentti M_o , joka lasketaan voimakomponenttien H ja sen pisteestä O lasketun etäisyyden perusteella kuvan 4.40 a) mukaisesti.



Kuva 4.40. Liitettäviin kappaleisiin syntyvät momentit. a) Loveuksen kohdalla alapaarteessa vaikuttava momentti. b) Rakenteen tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa vaikuttava momentti.

Figure 4.40. The moments in the jointed parts.

Mitoitusehtona käytetään loveuksen kohdalla syntyvää vetojännitystä, jonka tulee olla pienempi kuin kappaleen vetolujuus

$$\sigma_t = \frac{H}{(h_2 - t_{v2}) \cdot b_2} + \frac{f_t}{f_b} \frac{M_o}{W} \leq f_t \quad (46)$$

$$= \frac{1}{6} b_2 \cdot (h_2 - t_{v2})^2 \quad (47)$$

Rakenteen tasoa vastaan kohtisuoraan, kappaleiden heikompaan suuntaan syntyvä momentti M' johtuu kuvan 4.40 b) mukaisesti voiman vaikutussuoran ja liitettävien kappaleiden painopisteakselien etäisyydestä. Se on otettava huomioon suunniteltaessa rakenteen sivuttaistuenta ja rakenneosien nurjahdustuenta. Momentin aiheuttama taivutusjännitys tarkistetaan kappaleiden lovetuissa sekä loveamattomissa osissa

$$\sigma_b = \frac{M'}{W} \leq f_b \quad (48)$$

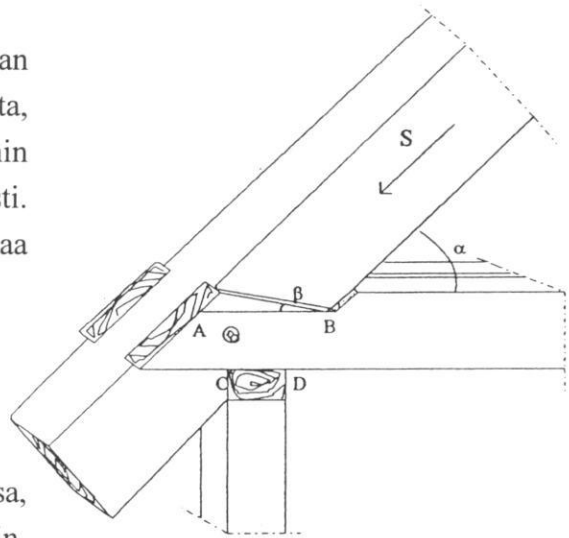
Liitoksessa syntyvää epäkeskisyyttä voidaan vähentää tekemällä vetotanko kahdesta osasta, jotka sijaitsevat puristussauvan molemmin puolin symmetrisesti kuvan 4.41 mukaisesti. Myös tällöin täytyy yläpaarteissa noudattaa lovisyvyydelle asetettuja rajoituksia.

4.3 Erikoisliitokset

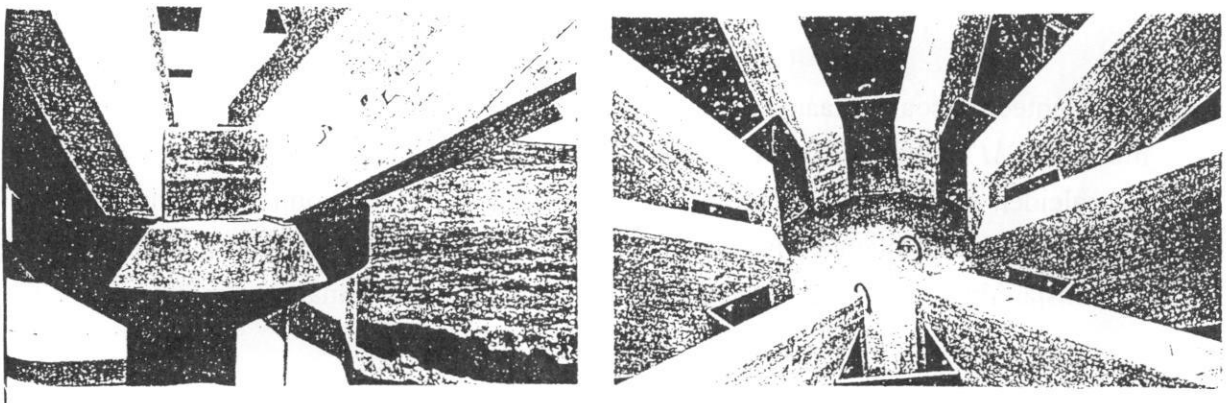
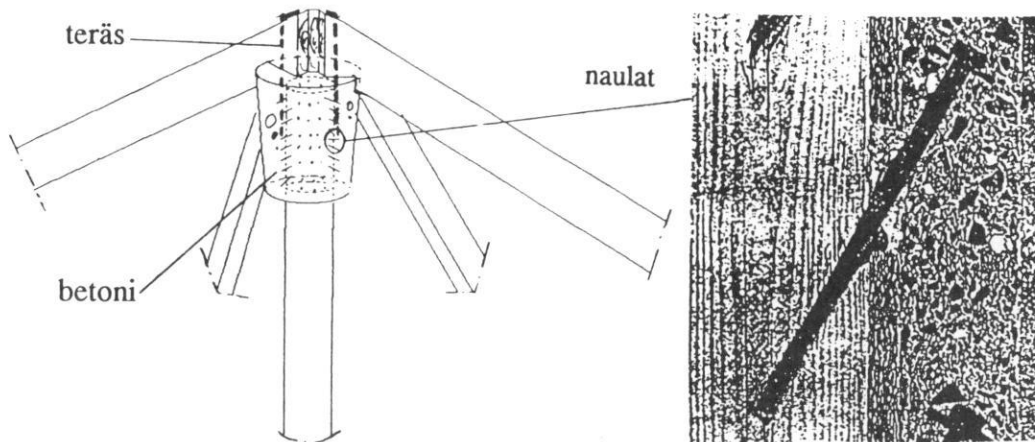
4.3.1 Betonin käyttö liitoksissa

Avaruusrakenteissa ja pilari-palkki-rakenteissa, joissa monta palkkia liitetään samaan pilariin, joudutaan pilarin päätä levittämään riittävän tukipinnan saamiseksi kaikille palkeille. Tuki-

pintaa voidaan kasvattaa satulapuuta käyttämällä, puusta tehdyillä ja pilariin kiinnitetyillä klosseilla tai tarkoitusta varten suunniteltua metallista liitoselimillä. Taloudellisesti pilarin päätä voidaan levittää betonoimalla siihen halutun suuruinen ja muotoinen levennys. Kuvassa 4.42 on betonin avulla tehtyjä puristusliitoksia.



Kuva 4.41. Symmetrinen lohenpyrstöliitos.
Figure 4.41. A symmetrical tension notch joint.



Kuva 4.42. Erilaisia betonin avulla tehtyjä puristusliitoksia /19/.
Figure 4.42. Some examples of joints made with concrete /19/.

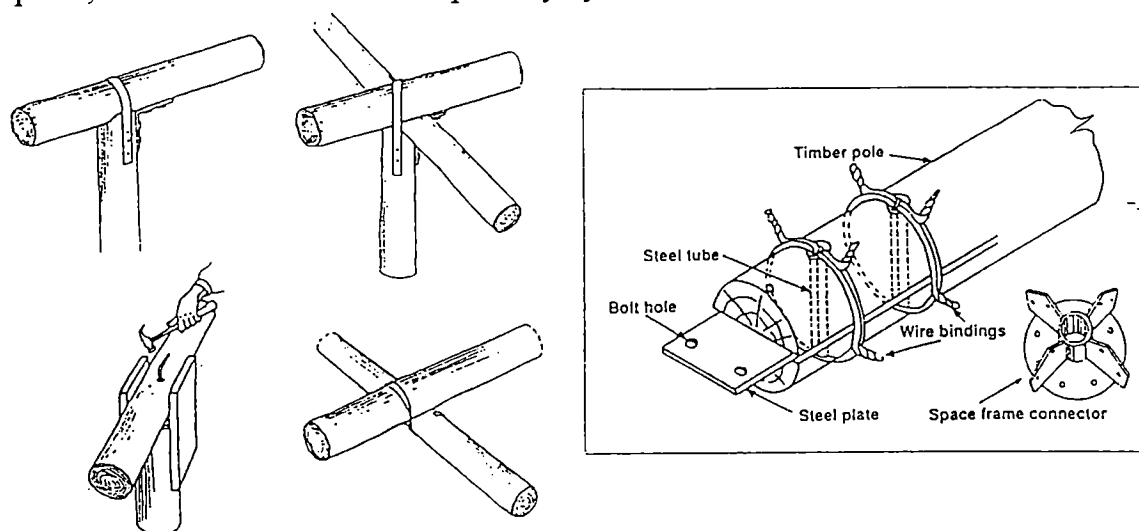
Betonimuottina voidaan käyttää mm. ämpäriä, tynnyriä tai tarkoitusta varten tehtyä muottia. Betoniin ja puun välinen kiinnitys hoidetaan puuhun lyödyillä nauloilla. Naulat varmistavat myös betonin ja puun yhteistoiminnan kummankin kuivuttua ja kutistuttua. Naulat lyödään puuhun niin, että osa, enintään puolet, jää betoniin tartunnaksi. Betonilevennys raudoitetaan, jotta puu ei imiessään kosteutta ja turvotessaan halkaise betonia. Puun turpoamista voidaan vähentää käsittelemällä pilarin pää kosteuden kulkua vähentävällä aineella, esimerkiksi nestemäisellä kosteussululla. Ennen betonivalua voidaan muottiin asentaa teräkset palkkien kiinnittämistä varten.

Betonin käyttö järeiden puurakenteiden liitoksissa on turvallista, mikäli liitos sijaitsee kuivassa tilassa. Tällöin betoni pyrkii tasapainokosteuteen ympäristön kanssa, jolloin se ei rakennekosteuden kuivuttua enää ime kosteutta ja puu pysyy kuivana. Ulkona ja kosteissa tiloissa, kuten maatalouden tuotantotiloissa, voidaan liitoksissa käyttää betonia, mutta tällöin tulee puu suojata lahonsuoja-aineilla.

Betonia voidaan käyttää myös teräsputkiliitoksissa, joissa teräsputket toimivat vaaroina. Putket valetaan täyteen betonia, jotta ne eivät puristu liitoksessa kasaan. Tällöin saadaan luja liitin, joka kestää sekä puristus- että leikkausrasitusta, ja on paloteknisesti hyvä. Teräs-betoni-putkia voidaan käyttää esimerkiksi kehänurkissa, joissa siirrettävät voimat ovat suuria. Liitoksia suunniteltaessa on otettava huomioon puuhun syntyvät poikittaiset vetojännitykset ja kosteusmuodonmuutokset. Liitettävien puiden vääntyminen irti toisistaan on estettävä sidepultilla.

4.3.2 Pyöreän puun erikoisliitokset

Pyöreän puun liitoksissa voidaan käyttää erityisesti pyöreää puuta varten kehitettyjä kuvan 4.43 mukaisia liitostyyppejä. Tällaisia ovat rautalankaliitos ja metallipantaliitokset. Rautalankaliitos on tarkoitettu pienipoikkileikkauksisen pyöreän puun liittämiseen, mutta sitä voidaan soveltaa myös suurempia poikkileikkauksia liitettäessä. Rautalanka kiristää puuta, niin ettei suuria halkeamia pääse syntymään.



Kuva 4.43. Pyöreän puun liitoksia.

Figure 4.43. Some examples of jointing roundwood.

Liitosta voidaan käyttää avaruusristikoissa ja palkkien jatkoksissa. Metallipantaliitoksia käytetään pilari-palkki-liitoksissa ja liitettäessä sekundääripalkkeja primääriin. Pilari-palkki-liitos voidaan tehdä myös puristusliitoksena, joka varmistetaan sivuille naulatuilla vanerilevyillä ja palkin läpi poratulla harjaterästangolla. Pilari-palkki-liitoksissa pilarin pää muotoillaan palkin muotoiseksi. Pyöreän puun liitoksia on käsitelty tarkemmin lähteessä /20/.

5 JÄREÄN PUUN VAHVISTAMINEN

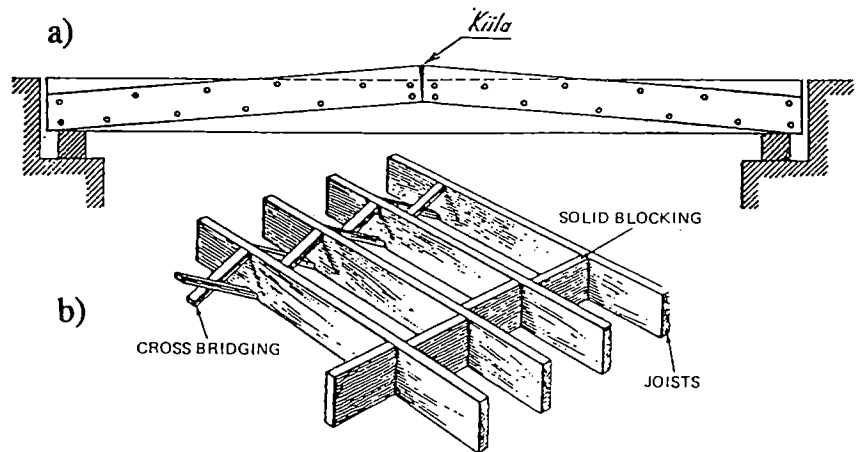
Syitä puurakenteiden vahvistamistarpeeseen ovat kuormitusten muuttuminen, alunperin alimitoitettut rakenteet tai rakenteen vaurioituminen kosteuden tai ylikuormituksen johdosta.

Vanha rakenne voidaan korjata vahvistamalla rakenteita tai korvaamalla ne uusilla. Halkeillutta puuta joudutaan joskus vahvistamaan myös liitosalueilla.

Yhteistä vahvistustoimenpiteille on, että rakenteet palautetaan alkuperäiseen muotoonsa ennen vahvistamista ja tarvittaessa annetaan rakenteille esikorotus.

Perinteisesti palkkien kantavuutta on lisätty pitkittäis- tai poikkisuuntaisella vahvistuksella eli armeerauksella (kuva 5.1), jolla voidaan lähinnä pienentää palkin taipumia. Pitkittäisessä vahvistuksessa palkin sivuille naulataan ylöspäin kaltevat laudat, jotka kiilataan palkin keskikohdalta. Laudat naulataan ensin kummastakin päästään kevyesti kiinni palkkiin. Tämän jälkeen palkki tunkataan ylös, ja laudat kiilataan palkin keskeltä, jonka jälkeen ne naulataan koko pituudeltaan kiinni palkkiin. Samalla palkkiin voidaan tehdä esikorotus.

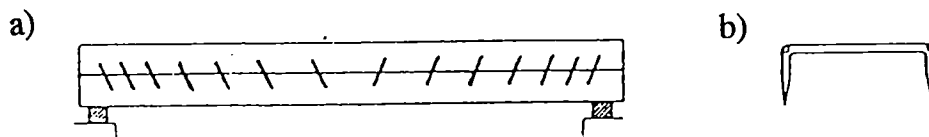
Poikittainen jäykistys tehdään kiinnittämällä palkkien väliin ristikkäiset puut tai teräkset, jolloin palkit toimivat tehokkaammin yhdessä ja kuormat tasaantuvat palkeille niiden jäykkyyksien ja lujuuksien suhteessa. Vahvistettavien palkkien on oltava kuivia, jotta jäykistys ei puun kuivumisen ja kutistumisen yhteydessä löysty.



Kuva 5.1 Järeän puupalkin vahvistus a) pitkittäisellä /21/ ja b) poikittaisella vahvistuksella /14/.

Figure 5.1. Some methods for strengthening wooden beams /21/, /14/.

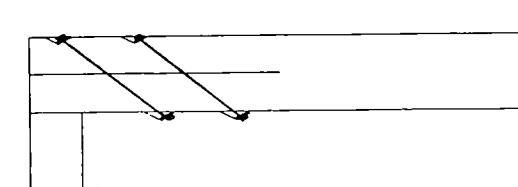
Perinteisesti halkeilleen palkin vahvistuksessa on käytetty myös sinkilöitä eli hakoja, joita käytetään edelleen Saksassa. Haat lyödään vasaralla puuhun. Hakavahvistus tehdään tunkaamalla halkeillut puu alkuperäiseen asentoonsa, ja lyömällä haat viistosti halkeaman yli kuvan 5.2 mukaisesti.



Kuva 5.2. a) Järeän puupalkin vahvistus sinkilöillä, ja b) sinkilä /21/.
Figure 5.2. a) Strengthening of wooden beam with staples, b) staple /21/.

Hakojen lujuus riippuu puun lujuudesta ja kosteudesta, haan jäykkyydestä, haan lyöntisyvyydestä, ja hakaa lyötäessä syntyneestä halkeamasta. Hakoja käytettäessä siirtymät kasvavat suuriksi. Jäykimmät haat tehdään neliönmuotoisista teräksistä. Haoille ei ole olemassa mitoitusohjeita, vaan hakojen lujuudet täytyy määrittää kokeellisesti /11/. Haat sinkitään yleensä korroosiota vastaan.

Halkeillutta puuta voidaan vahvistaa käyttämällä vinositeitä palkin päissä. Vinositeet asennetaan palkin ylöstunkkauksen jälkeen. Vinositeenä voidaan käyttää esimerkiksi pultteja, jotka asennetaan perusasennossa olevaan palkkiin. Pultteja tarvitaan yleensä vähintään kaksi palkin päähän. Pulttivahvistus on korjauskohteissa käyttökelpoinen ja paloteknisesti hyvä vahvistusmenetelmä. Pultit on kiristettävä puun kuivuttua käyttötilaan. Kuvassa 5.3 on pultein vahvistettu palkki. Pulttien sijaan voidaan käyttää myös liimaruuveja. Liimaruuvit sijoitetaan vahvistettavaan palkkiin pulttien tapaan.



Kuva 5.3. Järeän puupalkin vahvistus vinositeenä toimivilla pulteilla.

Figure 5.3. Strengthening of a wooden beam with bolts.

Vaneria voidaan käyttää halkeilleen puun vahvistuksessa naulauslevyn tapaan. Tällöin vahvistus on helppo tehdä ja mitoittaa, vaikkakin tarvittavien naulojen määrä on suuri. Vahvistuksen palonkestävyys hyvä. Vanerilla

vahvistettu palkki voidaan mitoittaa kotelopalkkina, jossa vaneri kantaa osan leikkausvoimasta. Liitoksia voidaan vahvistaa naulaamalla tai liimanaulaamalla liitosalueelle vanerilevyt. Halkeilleen puun ja liitoksien vahvistuksessa voidaan käyttää myös erilaisia naulalevyjä, joilla liitosalueiden halkeilua voidaan vähentää ja tasata.

Palkistoa voidaan jäykistää myös valamalla sen päälle betonilaatta, jolloin saadaan liittorakenne. Betonilaattaa valettaessa täytyy palkisto tukea alapuolelta, jotta tuoreen betonin paino ei ylitä palkiston kantokykyä, ja jotta palkisto saadaan nostettua alkuperäiseen asentoonsa. Betonin ja puupalkkien yhteistoiminta aikaansaadaan puuhun osittain lyödyillä nauloilla tai vaarnoilla.

Halkeillutta puuta voidaan vahvistaa injektoimalla epoksia vauriokohtiin. Halkeama liimataan vasta, kun palkki on tunkattu ylös.

6 JÄREÄN SAHATAVARAN KÄYTTÖSOVELLUTUKSIA

Esimerkki-rakenteiden mitoituksessa käytetään rajatilamenettelyä. Murtotilassa tarkistetaan, etteivät rakenteen laskentakuormien aiheuttamat rasitukset ylitä sen kapasiteettia. Käyttötilassa tarkistetaan, etteivät rakenteen muodonmuutokset kasva sallittua suuremmiksi. Asuinrakennuksissa rajoitetaan puun taipumia ja halkeilua enemmän kuin toisarvoisissa rakennuksissa. Varastorakennuksissa sallitaan puurakenteisen suunnitteluohjeista /12/ poiketen taipuma $l/100$, mikäli siitä ei ole toiminalle eikä liittyville rakenteille haittaa.

Materiaalien laskentalujuudet ja kimmomoduulit saadaan ominaislujuuksista SRakMk:n osassa B10 esitettyjen materiaalin osavarmuuskertoimien avulla ottaen huomioon puun kosteus- ja aikavaikutuskertoimet.

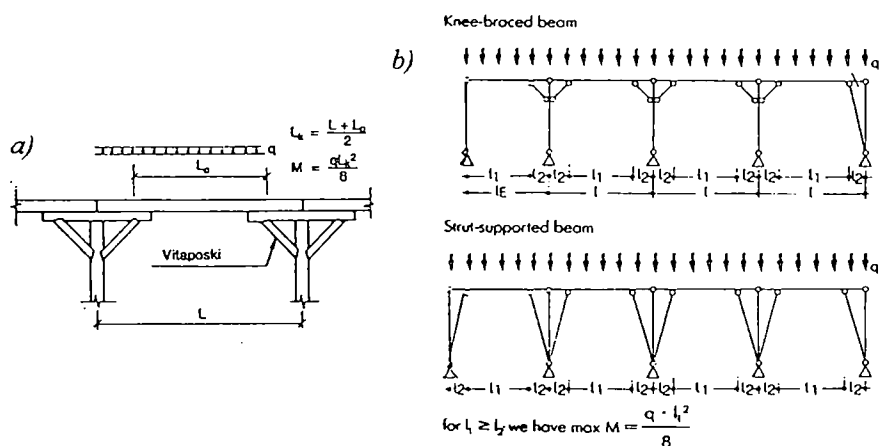
Järeät palkit voivat olla tasakorkeita tai kiilamaisia. Kartiomaisten palkkien mitoitus poikkeaa tavallisten palkkien mitoituksesta siten, että suurimmat taivutusreunajännitykset eivät esiinny maksimimomentin kohdalla. Lisäksi leikkausjännitys jakauma poikkeaa tasakorkean palkin jakaumasta.

6.1 Vitaposkirakenne

Vitaposkirakenteita käytetään vielä runsaasti Keski-Euroopassa asuinrakennuksissa ja erilaisissa varasto- ja tuotantorakennuksissa välipohjan ja yläpohjan kannatukseen. Vitaposkien avulla pidennetään pilariväliä. Toispuoleinen vitaposki aiheuttaa pilariin suuren taivutusmomentin, jolloin voidaan käyttää vinotukia tai reunimmaisten pilareiden väli voidaan tehdä niin lyhyeksi, että palkin taivutusmomentti saadaan ilman reunimmaiseen pilariin liitettyä vitaposkea yhtä pieneksi kuin muissa väleissä.

Suomalaisen ohjeen /12/ mukaan vitaposkirakenne voidaan mitoittaa yksikertaisena palkkina kuvan 6.1 a) mukaisesti.

Lähteen /6/ mukaan mitoitetetaan vitaposkirakenne yksinkertaisena palkkina kuvan 6.1 b) mukaisesti. Tällöin pilarien etäisyydet saavat poiketa toisistaan enintään 20 %.



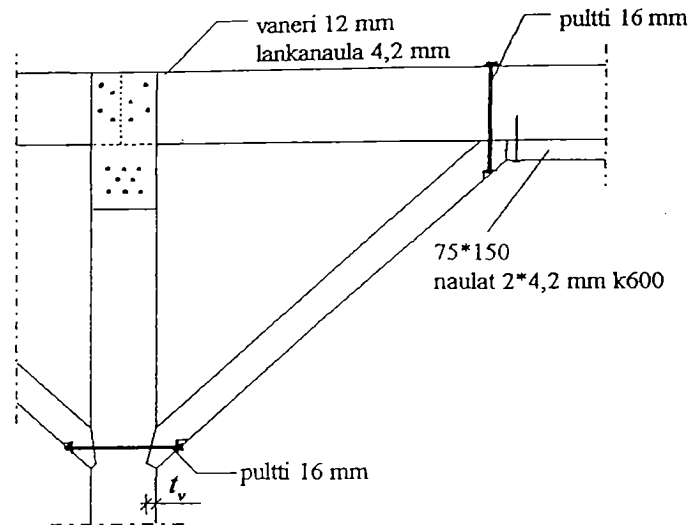
Kuva 6.1. Vitaposkirakenteen mitoitus a) ohjeen /23/ ja b) ohjeen /6/ mukaisesti.

Figure 6.1. Structural model of knee-braced beams a) according to /23/ and b) according to /6/.

Vitaposket liitetään pilareihin vinokulmaisin loviliitoksiin, apupuuta tai metallisia liitinelimiä käyttäen.

Vitaposken kohdalla palkin jännitykset ovat niin suuret, ettei palkkia voida loveta. Liitos voidaan tehdä naulaamalla palkin alapintaan vitaposkien välille apupuuta, joka kantaa vitaposkiin vaikuttavan sauvavoiman vaakakomponentin.

Esimerkki vitaposken ja palkin sekä pilarin välisestä liitoksesta on esitetty kuvassa 6.2.

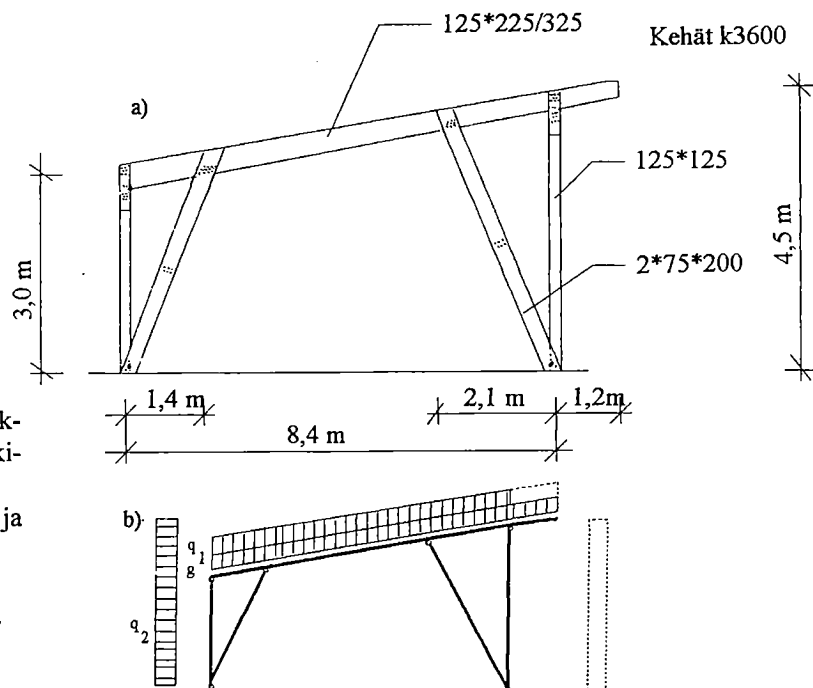


Kuva 6.2 Vitaposken liittyminen pilariin ja palkkiin.
Figure 6.2. A knee-braced beam joint.

6.2 Hallien ja varastotilojen runkojärjestelmät

Järeästä sahatavarasta tehdyillä kehärakenteilla päästään 12..15 m:n jänneväliin. Kiilamaisesti sahatun järeän sahatavaran käytön etuna kehissä on, että eniten rasitettuun osaan rakennetta saadaan suurempi puupoikkileikkaus.

Esimerkkeinä mitoitetaan kaksi erilaista kehää. Ensimmäinen kehä on kuvan 6.3 mukainen yhdistetty kaksinivelkehä, jännemitaltaan 8,4 m. Rakennus mitoitetaan kehien tason suunnassa stabiiliksi tuulikuormia vastaan, mutta kehän tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa rakennus jäykistetään ristikkojäykistyksellä.

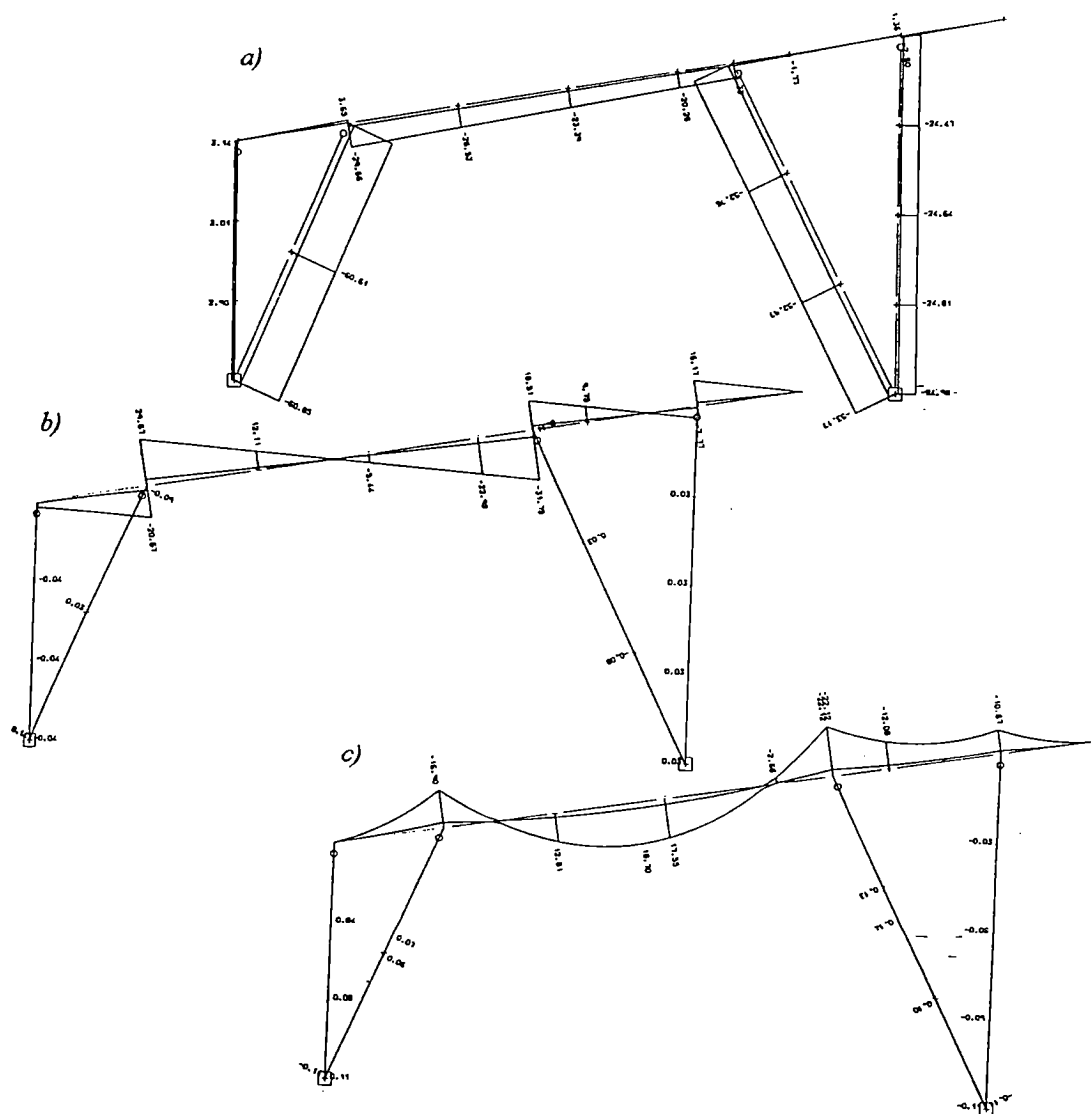


Kuva 6.3. a) Yhdistetty kaksinivelkehä ja valitut puupoikkileikkaukset sekä b) kehään vaikuttavat kuormat ja laskentamalli.

Figure 6.3. a) Two-hinged girder system and b) loadings.

Järeän sahatavaran lujuudet lasketaan lujuusluokassa T30. Kehät tuetaan nurjahdusta vastaan 0,6 m välein olevin sekundäärirakentein. Laskennassa liitokset oletetaan nivelellisiksi.

Elementtimenetelmällä laskettuna saadaan kehälle kuvassa 6.4 esitetyt voimakuvioiden verhokäyrät ja maksimijännitykset, jolloin voidaan todeta valittujen poikkileikkausten riittävän. Rakenne on mitoitettu kuvan 6.3 b) rakennemallin mukaisesti.



Rakenneosa Structural element	σ_c [N/mm ²]	σ_t [N/mm ²]	τ [N/mm ²]	σ_b [N/mm ²]	Yhteisvaikutus Combined effect
Palkki <i>Beam</i>	0,76	0,09	1,42	11,34	0,81
Pilari <i>Column</i>	1,60	0,30	0,01	0,66	0,62
Vinotuki <i>Diagonal</i>	2,46	-	0,01	0,17	0,79

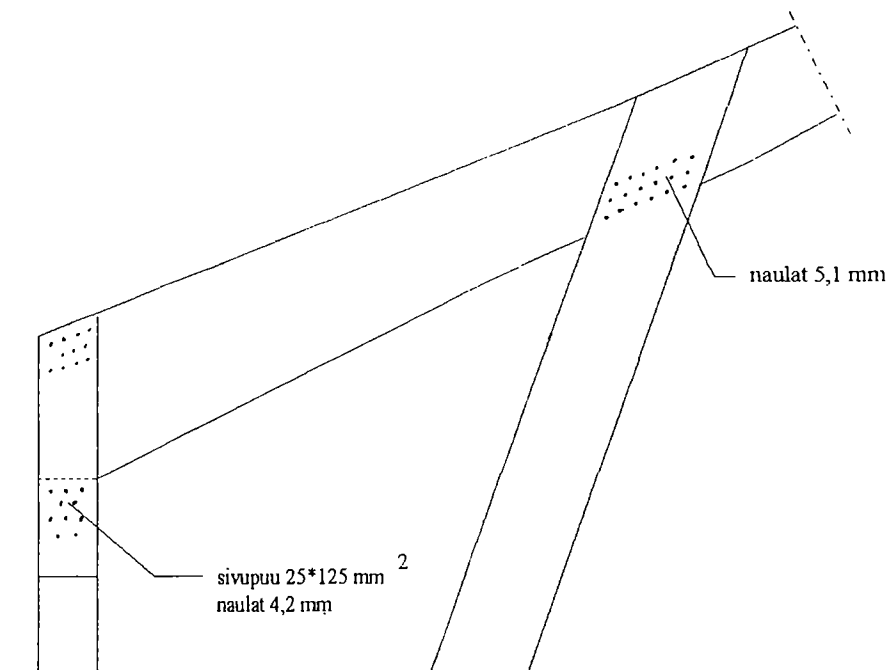
Kuva 6.4. Yhdistetyn kaksinivelkehän voimakuviot ja maksimijännitykset aikaluokassa B laskentakuormista. a) Normaalivoima, b) leikkausvoima ja c) taivutusmomentti.

Figure 6.4. Two-hinged frame. The a) axial force b) shear c) moment diagram and maximum stresses for design loads.

Koska on oletettavissa, että liitokset siirtävät momenttiakin, tarkistetaan mitoitus mallilla, jossa liitokset ovat jäykät. Tällöin palkin voimakuviot eivät juurikaan muutu, mutta pilarien ja vinotukien momentit kasvavat enintään arvoon 4,97 kNm. Pystyrakenteet kestävät myös jäykkien liitosten tapauksessa syntyvät momentit.

Palkin ja pilarien sekä vinotukien väliset liitokset tehdään naulaamalla. Palkin ja pilarin välisessä liitoksessa käytetään sivupuita 25 x 125 mm ja nauloja 100 x 4,2. Pilarien ja palkin välisissä liitoksissa tarvitaan 11 naulaa molemmin puolin, ja naularyhmä sijoitetaan palkin yläosaan. Kaksiosainen vinotuki naulataan palkkiin kiinni molemmin puolin 5,1 mm paksuilla lankanauloilla, jolloin vinotuki toimii samalla palkin kiepahdustukena. Naulojen reiät esiporataan, jotta liitoksen siirtymät jäävät pienemmiksi. Nauloja tarvitaan 18 kappaletta palkin molemmin puolin. Vinotukien kohdalla naulat lyödään mahdollisimman lähelle palkin alareunaa kuitenkin niin, että naulojen reunaetäisyydet täyttyvät. Sijoittamalla naulat palkin alareunaan ehkäistään puristusliitoksessa palkkiin syntyvä mahdollinen poikittainen vetojännitys. Kaksiosainen vinotuki liitetään yhdeksi vinotuen keskeltä naulaamalla, jolloin vinotukien väliin sijoitetaan $125 \times 125 \text{ mm}^2$ apupuu. Palkin ja pilarin sekä vinotuen välinen liitos on esitetty kuvassa 6.5. Pilarin ja vinotuen välinen liitos tehdään naulaamalla pilari vinotukien väliin.

Tarkastellaan seuraavana esimerkkinä kuvan 6.6 mukaista yhdistettyä kolminivelkehää, jonka jännemitta on 12 m ja kehäväli on 3,6 m. Kehäpalkit on tehty kahdesta kiilamaisesti sahatusta järeästä lankusta, leveys 75 mm ja korkeus seinälinjalla 375 mm ja harjalla n. 275 mm. Ulkoseinälinjalla oleva vertikaali on 75 x 200 mm² lankku ja vino diagonaali koostuu kolmesta 75 x 175 mm² lankusta. Liitokset on toteutettu pultti-hammasvaarnaliitoksien. Diagonaalin ja kehäpalkin liitoksessa on käytetty vinokulmaista loviliitosta.



Kuva 6.5. Liitosdetalji.

Figure 6.5. A detail of the joint.

Kehärakenteen rakenteellisessa mitoituksessa on otettava huomioon useita mitoitus- ja kuormitustapauksia. Kolminivelkehä aiheuttaa vaakavoimia perustuksille, joten tämä on otettava perustusten suunnittelussa huomioon.

Kehän rakennesuunnittelussa on tarkistettava seuraavat kuormitustapaukset:

- aikaluokka B, omapaino ja täysi lumikuorma
- aikaluokka C, mahdollisimman epäsymmetrinen kuormitustapaus; esim. tuuli vasemmalta, lumi vasemmalla lappeella ja puoli lumikuormasta oikealla lappeella. Kuormien yhdistely ja kuorman osavarmuuskertoimet määrätään käytettävän kuormitusohjeen mukaan.
- aikaluokka C, omapaino ja tuulen imu.

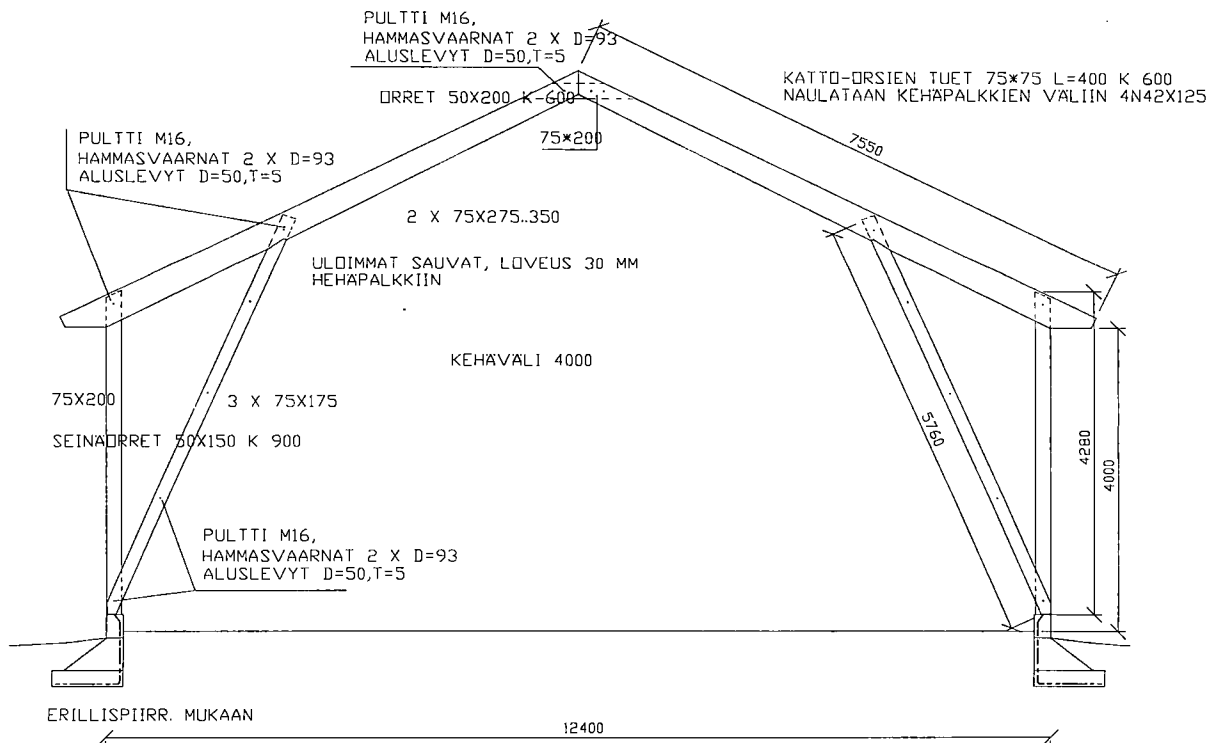
Kehän mitoituksessa tarkistetaan seuraavat asiat:

- kehäpalkin mitoitus yhdistetylle taivutukselle ja normaalivoimalle.
- Nurjahduspituutena kehän nurjahtaessa tasostaan käytetään siteinä toimivien sekundääri-rakenteiden väliä. Sekundäärien kiinnitys ja sekundäärit mitoitetaan kehän vakauden vaatimille tukivoimille.

Nurjahduspituus, kun kehä nurjahtaa tasossaan, lasketaan kaavalla 1

$$L_c = 0,7 \cdot a + 2 \cdot b \quad (1)$$

Merkinnät käyvät selville kuvasta 6.8.



Kuva 6.6. Yhdistetty kolminivelkehä ja valitut puupoikkileikkaukset.

Figure 6.6 Three-hinged frame.

Kun palkkirakenteen puristettu syrjä on ilman sivuttaistukea, on vaara, että palkki kiepahtaa. Epäsymmetrisellä kuormitustapauksella voi palkin tukematon alapinta tulla puristetuksi, joten se on tarvittaessa tuettava kiepahdusta vastaan. Massiivipoikkileikkauksella kiepahdustukien väli voidaan määrätä seuraavasta yhtälöstä:

$$L_k * h / b^2 < 115 \quad (2)$$

jossa L_k = kiepahdustukien väli
 h = palkin korkeus
 b = palkin leveys

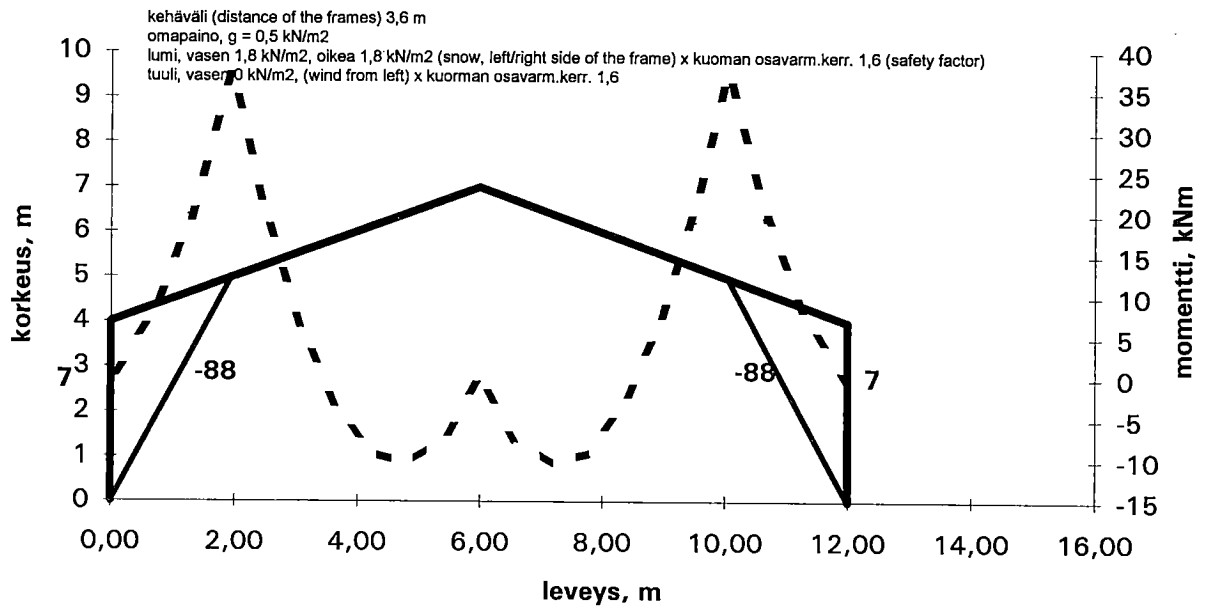
- vertikaalisauva mitoitetaan yhdistetylle vedolle/taivutukselle tai puristukselle/taivutukselle kuormitustapauksesta riippuen. Nurjahdus otetaan huomioon ja huomiota kiinnitetään liitosten mitoitukseen.
- diagonaalisauva mitoitetaan puristukselle ottaen huomioon sauvan nurjahdus. Jos sauva kootaan mekaanisin liittimin useammasta osasta, sauva mitoitetaan kehäsauvana esim. RIL 120 ohjeiden mukaisesti.
- ylänivel mitoitetaan epäsymmetrisen kuormitustapauksen aiheuttamalle maksimi leikkausrasitukselle
- esimerkissä noin 1/3 diagonaalin ja kehäsauvan voimista siirretään vaarnaliitoksen välityksellä ja 2/3 voimista kontaktiliitoksella.

Kuvassa 6.7 a) on esitetty rakenteen kehäpalkin momenttijakauma symmetrisestä kuormituksesta ja nurkan sauvojen normaalivoimat, ja b) kehäpalkin kapasiteetin käyttöaste prosentteina. c) kehäpalkin kapasiteetin käyttöaste epäsymmetrisessä aikaluokan C kuormitustapauksessa. Käyttöaste on laskettu kaavalla:

$$R = \frac{\sigma_c}{k_s f_c} + \frac{\sigma_b}{k_k f_b} \quad (3)$$

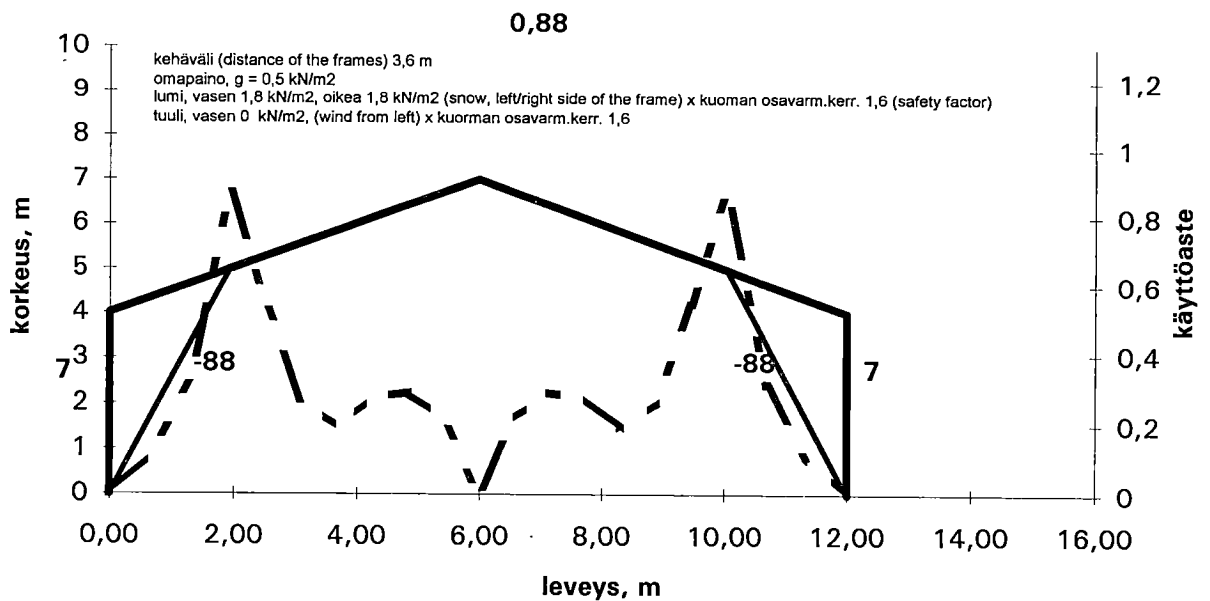
jossa σ_c = laskentakuormien aiheuttama puristusjännitys
 σ_b = laskentakuormien aiheuttama taivutusjännitys
 k_c = nurjahduksen huomioon ottava kerroin
 k_k = kiepahduksen huomioon ottava kerroin

KEHÄPALKIN MOMENTTIJAKAUMA the moment distribution of the beam



KEHÄPALKIN KAPASITEETIN KÄYTTÖASTE:

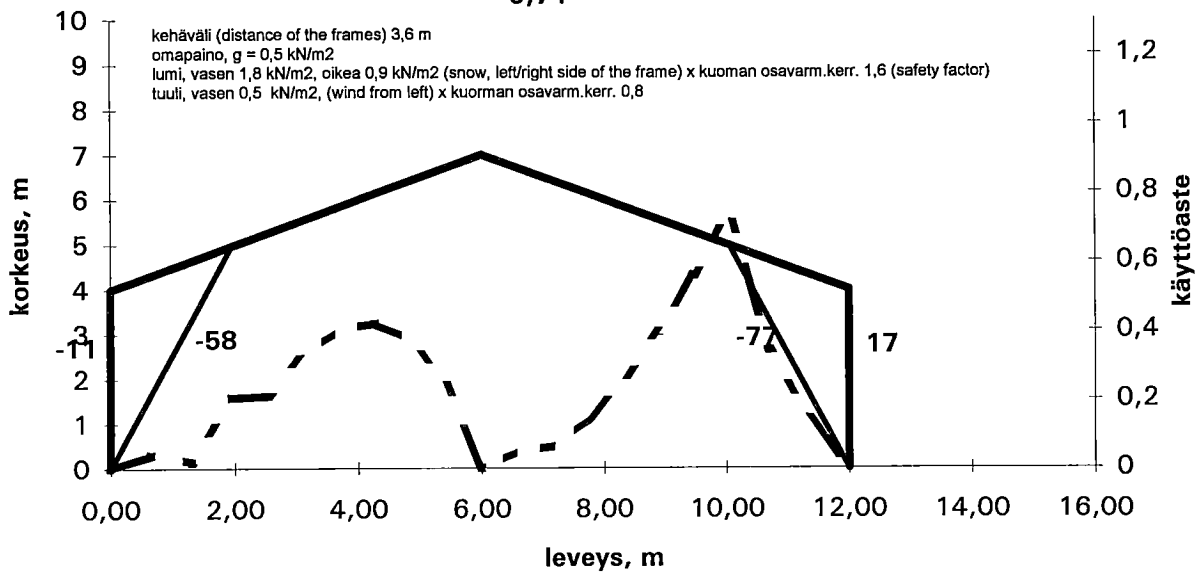
$$\left| \frac{M}{W \cdot f_b} \right| + \left| \frac{N}{A \cdot k_s \cdot f_c} \right|$$



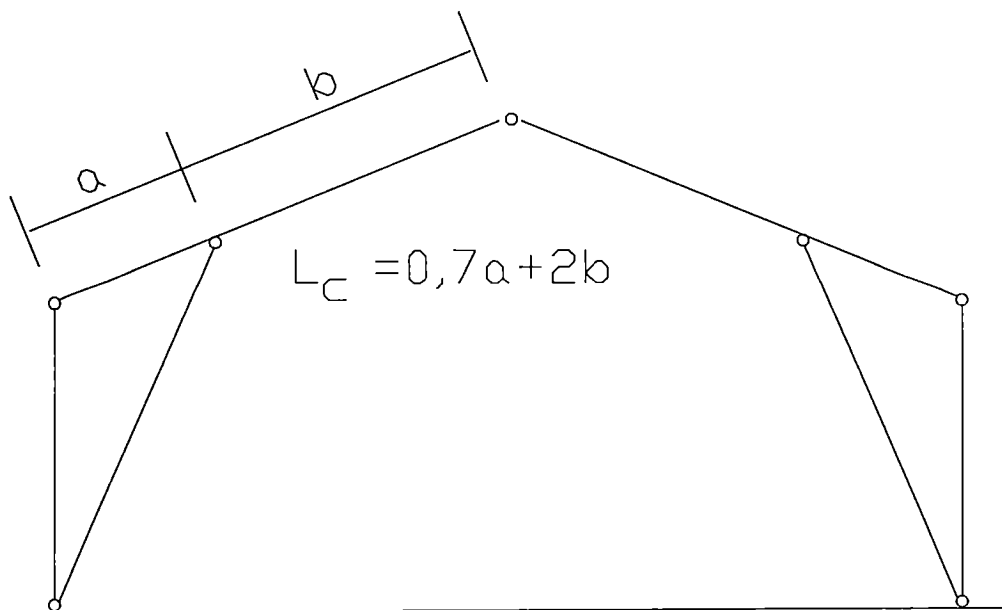
KEHÄPALKIN KAPASITEETIN KÄYTTÖASTE:

$$\left| \frac{M}{W \cdot f_b} \right| + \left| \frac{N}{A \cdot k_s \cdot f_c} \right|$$

0,74



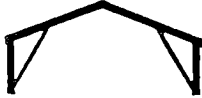


Kuva 6.7 Kuvan 6.6 mukaisen kehärakenteen kehäpalkin momenttijakaumat ja kapasiteetin käyttöaste.
Figure 6.7 The moment distribution and the ratio for rupture for the frame (figure 6.6).



Kuva 6.8. Yhdistetyn kolminivelkehän kehäpalkin nurjahduspituus tasonurjahduksessa.
Figure 6.8. The buckling length of the main beam of the three hinged-frame.

Verrataan kolminivelkehärakennetta taulukon 6.1 mukaisesti vastaaviin liimapuukehä- ja kantavat seinät - kattoristikko -rakenteisiin halleihin. Liimapuun materiaalikustannuksina käytetään 4500 mk/m³. Liimapuukehä tehdään ilman vinotukia, jolloin rakennuksen koko sisätila on vapaa. Kantavat seinät - kattoristikko -rakenteisessa hallissa kattoristikot asennetaan 0,9 metrin välein kantavien seinien varaan. Kattoristikon hintana käytetään 50 mk/jm. Kantava seinä tehdään 50 × 125 mm² k600 runkotolpista sekä näiden päälle asennettavasta 75 × 200 mm² palkista. Kattoristikkoa käytettäessä sisätila on matalampi kuin kehäratkaisussa. Taulukosta 6.1 voidaan todeta järeästä sahatavarasta tehdyn hallin olevan materiaalikustannuksiltaan edullisin kyseisellä jänneväliellä.

Taulukko 6.1 Materiaalikustannusten vertailu järeästä sahatavarasta ja liimapuusta tehdyn rungon sekä kantavat seinät - kattoristikot -rakenteisen rungon välillä. Järeän sahatavaran materiaalikustannuksiksi oletetaan 1500 mk/m³, normaalin sahatavaran 1000 mk/m³, liimapuun 4500 mk/m³ ja kattoristikon 50 mk/jm.
Table 6.1 Comparison of material costs for frame works made of large timber, glued-laminated beams and carrying walls + trusses. The material cost of large timber is supposed to be 1500 mk/m³, normal timber 1000 mk/m³, glued-laminated beams 4500 mk/m³ and trusses 50 mk/running metre.

Rakennustyyppi <i>Type of framework</i>	Rakenneosa <i>Structural element</i>	Puumenekki <i>Wood consumption</i> [m ³ /m ²]	Materiaalikustannukset <i>Material costs</i>
Järeästä sahatavarasta tehty yhdistetty kolminivelkehä k3600 <i>Timber frame c3600</i> 	Palkit <i>Beams</i> 150 × 275/350 mm ² Pilarit <i>Columns</i> 75 × 200 mm ² Vinotuet <i>Bracing bands</i> 3 × 75 × 175 mm ² Sekundäärit k600 <i>Purlins c600</i> 50 × 200 mm ²	0,0157 0,0023 0,0072 0,0278	Puumenekki järeäsahtavara <i>Heavy timber</i> 0,0229 Sahatavara <i>Timber</i> 0,0301 m ³ /m ² Materiaalikustannukset <i>Material costs</i> 64 mk/m ²
Liimapuukehä k3600 <i>Glue-laminated frame c 3600</i> 	Palkit <i>Beams</i> 100 × 350/675 mm ² Pilarit <i>Columns</i> 100 × 475/575 mm ² Sekundäärit k600 <i>Purlins c600</i> 50 × 200 mm ²	0,0142 0,0097 0,0278	Puumenekki liimapuu 0,0239 Sahatavara <i>Timber</i> 0,0278 m ³ /m ² Materiaalikustannukset <i>Material costs</i> 135 mk/m ²
Kantavat seinät - kattoristikot -rakenteet <i>Load bearing trusses walls</i> 	Yläjuoksut <i>Beams</i> 75 × 200 mm ² Runkotolpat k600 <i>Posts c600</i> 50 × 125 mm ² Kattotuolit k900 <i>Trusses c900</i> Sekundäärit k600 <i>Purlins c600</i> 50 × 75 mm ²	0,0025 0,0069 0,0063	Puumenekki sahatavara 0,0157 m ³ /m ² Kattotuoli <i>Truss</i> 1,1111 jm/m ² Materiaalikustannukset <i>Material costs</i> 71 mk/m ²

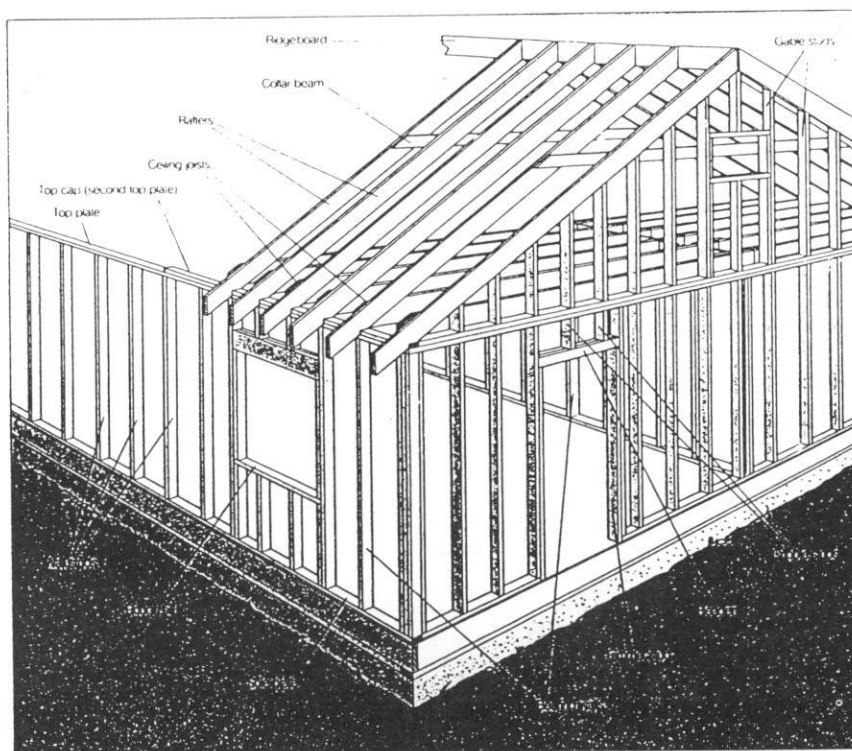
6.3 Asuinrakennukset

Puun käyttö on yleisintä pientaloissa. Pientalot tehdään yleensä kantavat seinät -rakenneljärjestelmällä, jolloin ulkoseinät ja mahdollisesti osa sisäseinistä ovat kantavia.

Järeästä sahatavarasta tehdyillä pilari-palkki-rakenteilla saadaan taipumarajoituksista johtuen asuinrakennuksissa suurimmaksi jänneväliksi 4,8 m, jota voidaan haluttaessa kasvattaa käyttämällä vitaposkirakenteita tai yhdistämällä palkkeja vaarnapalkkeiksi. Pilari-

palkki-liitokset voidaan tehdä puristusliitoksina, mutta palkin vääntymisen takia varmistetaan liitos esimerkiksi pilarin ja palkin väliin asennetulla tappivaarnalla.

Kantavat seinät tehdään Yhdysvalloissa yleensä ns. "platform"-rakenteena. Tällaisella rakenteella saavutetaan useita etuja. Käytettäessä järeää puuta lattiapalkkeina, kutistuvat palkit puun kuivuessa. Kun seinä on tehty lattian päälle, laskee se lattian kutistumisen myötä, eikä lattian ja seinän yhtymäkohtaan muodostu rakoa, eikä muita vaurioita. Seinät on helppo rakentaa välipohjan päällä valmiiksi seinämiksi, jotka nostetaan pystyyn ja kiinnitetään välipohjaan. Paloteknisesti "platform"-rakenteella saavutetaan se etu, että seinäontelot katkeavat kerrosten välillä, jolloin ilmavirtaukset ja tulipalo eivät pääse kulkemaan kerroksesta toiseen vapaasti seinäonteloissa. Ongelmaksi "platform"-rakenteessa muodostuu höyrynsulun asentaminen tiiviisti välipohjien kohdalla sekä välipohjapalkkien kohtisuora puristus seinälinjojen alla.

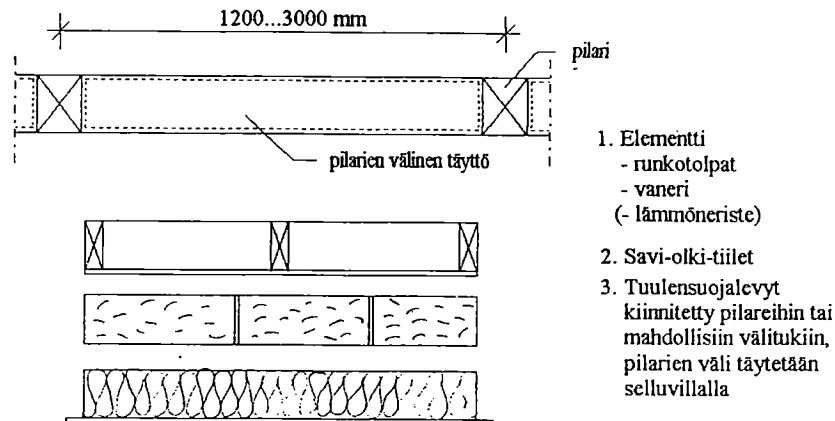


Kuva 6.9 Platform rakennejärjestelmä /24/.
Figure 6.9 The platform framing /24/.

Runkotolpat voidaan tehdä nykyisen käytännön mukaisesta $50 \times 125 \text{ mm}^2$ sahatavarasta 600 mm välein tai joka toinen tolppa 75×125 (100×125) mm^2 . Runkotolpat liitetään naulaamalla alajuoksuun ja kaksinkertaiseen yläjuoksuun, $50 \times 125 \text{ mm}^2$. Taulukossa 6.2 on esitetty aukkopalkkien mittoja eri aukko- ja rakennuksen runkoleveyksillä. Suurimpien mahdollisten aukkojen koko määräytyy aukon päälle jäävästä tilasta. Seinän korkeudeksi on platform-tavalla rakennettuna vakiintunut 2,5 m. Tällöin yläjuoksujen ja ikkunan yläreunan väliin jää 275 mm, jolloin voidaan käyttää järeää puupalkkia $125 \times 275 \text{ mm}^2$. Aukon reunoihin tehdään kaksinkertaiset runkotolpat, joista toisen päälle aukkopalkki tuetaan.

Seinän runko voidaan tehdä myös järeästä sahatavarasta kuvan 6.10 mukaisena pilari-palkki-rakenteena, jolloin pilarien väli voi olla 1,2...3,0 m ja palkkien koko taulukon 4.5 mukainen. Pilarien väleihin voidaan kiinnittää erilliset seinäelementit. Elementin ja pilarin väliseen liitokseen tulee kiinnittää erityistä huomiota, jotta liitoksessa saavutetaan riittävä ilman ja vesihöyryn tiiviys. Samasta syystä rajataan myös palkin taipumaa. Pilari-palkki-rakenteisen seinän pilarit ja palkit voidaan jättää näkyviin seinäpinnassa, tai ne voidaan peittää levytyksellä. Pilari-palkki-rakennetta käytettäessä voidaan perustukset tehdä pilariperustuksena.

Järeästä sahatavarasta tehty kolmioristikko on taloudellinen rakenne, jossa puun kulutus on hieman suurempi kuin normaaleissa ristikoissa, mutta liitokset on tehtävissä kirvesmiesliitoksina. Katto voidaan tehdä myös pilari-palkki-linjan varaan asennettuna järeänä palkistona. Sekundäärirakenteet voidaan tehdä palkkien väliin tai palkit voidaan jättää näkyviin alla olevaan tilaan.



Kuva 6.10. Pilari-palkki -rakenteinen seinä ja periaatteellisia esimerkkejä pilarien välisistä täytöistä.
Figure 6.10. A post-beam wall construction.

Esimerkkinä mitoitetaan kuvan 6.11 mukainen järeästä sahatavarasta tehty 8,4 m leveä asuinrakennus, jossa runko tehdään "platform"-rakenteisena. Ulkoseinät ovat kantavia ja lattia rakennetaan järeän palkiston varaan. Rakennuksen keskellä kulkee väli- ja yläpohjaa kannattava pilari-palkkilinja, jossa pilarit ovat 3,6 m välein. Rakennuksen keskellä kulkee kellarissa kantava seinä, johon pilarit ja ensimmäisen kerroksen välipohjapalkit voidaan tukea. Väli- ja yläpohjapalkit jätetään näkyviin alla olevaan tilaan. Mitoittava kuormitusyhdistelmä kuuluu aikaluokkaa B.

Taulukko 6.2. "Platform"-rakenteisen asuinrakennuksen aukkojen ja aukkopalkkien koot, kun aukkopalkin taipuma on rajattu arvoon $l/300$. T30/B/2. Aukkopalkeille tulee katto kuormina rakenteen omapaino $g = 0,5 \text{ kN/m}^2$ ja lumi-kuorma $q = 1,8 \text{ kN/m}^2$.

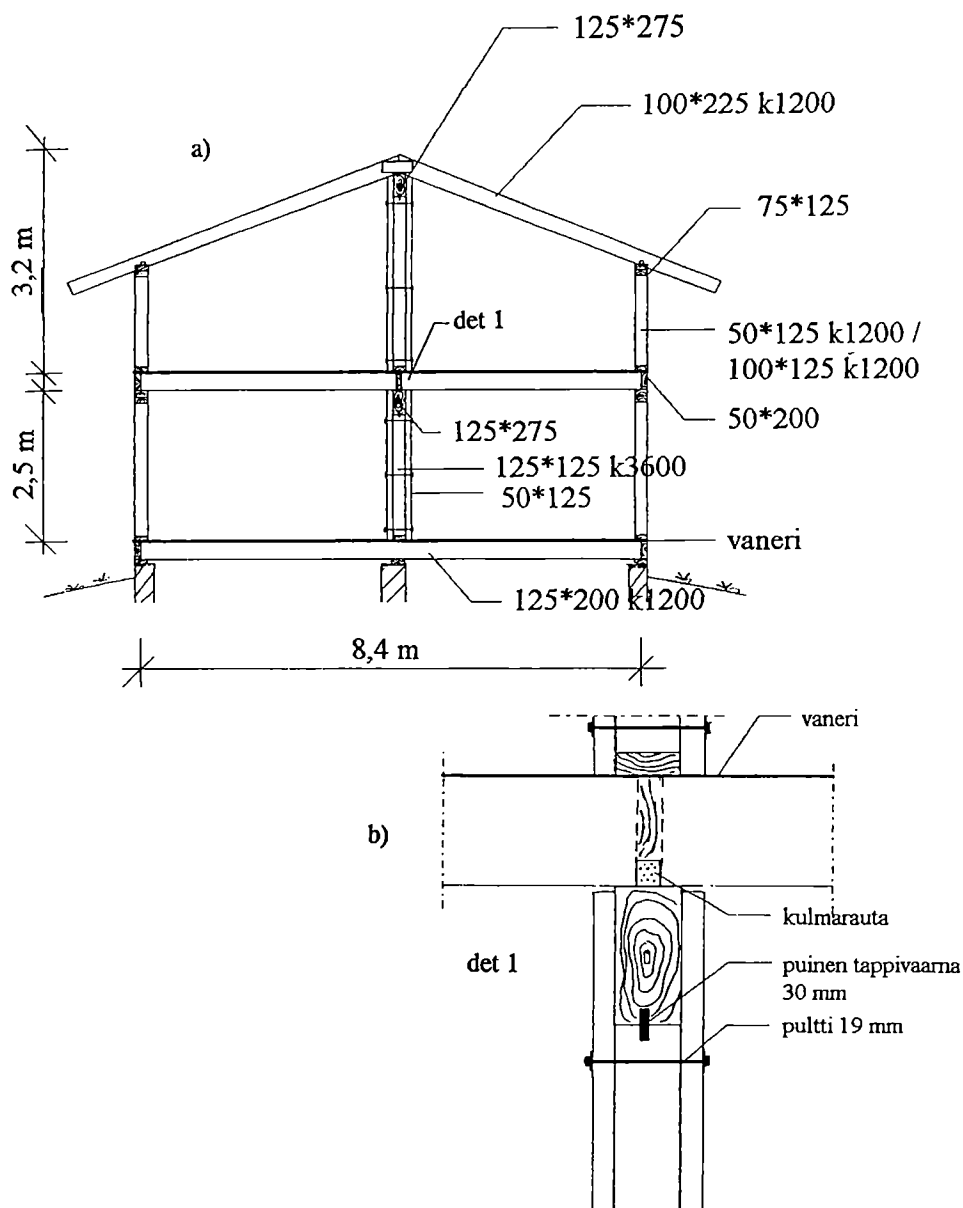
Table 6.2. Some examples of opening headers in single storey structures.

Aukon pituus Width of opening l [m]	Rakennuksen leveys Width of building b [m]	Aukkopalkki Opening header $b \times h$ [m ²]
1,2	7,2 ja 9,6	125 x 125
1,8	7,2 9,6	125 x 150 125 x 175
2,4	7,2 9,6	125 x 200 125 x 225
3,0	7,2 9,6	125 x 250 125 x 275

Ominaiskuormat ovat:

rakenteen omapaino	5,0	kN/m ³
katon ja lattian omapaino	0,5	kN/m ²
lumikuorma	1,8	kN/m ²
hyötykuorma	1,5	kN/m ² .

Järeän sahatavaran lujuudet lasketaan lujuusluokassa T30, aikaluokassa B ja kosteusluokassa 1. Yläpohjan taipumarajaksi asetetaan 1/200 ja välipohjan 1/300. Lisäksi rajataan pistekuorman 1,5 kN aiheuttama välipohjien taipuma arvoon 2 mm.



Kuva 6.11. a) Kantavat ulkoseinät-järeä välipohjapalkisto -rakenteinen 2-kerroksinen kellarillinen asuinrakennus. Rakennuksessa käytetään platform-periaatetta. Ylä- ja välipohjat sekä rakennuksen keskellä oleva pilari-palkki-linja tehdään järeästä sahatavaraista.

Figure 6.11. a) A frame for two storey dwelling using large dimension timber.

Koska keskilinjän palkki kantaa suuria kuormia, tehdään se jatkuvana vähintään kahden kentän yli, jotta taipumat jäävät pienemmiksi. Palkki liitetään pilariin tappiliitoksella, ja pilariin pultein kiinnitetyt sivupuut toimivat palkin kiepahdustukina. Palkki jatketaan ripustusliitosta käyttäen.

Kun järeästä sahatavarasta tehtyä asuinrakennusta verrataan taulukon 4.6 mukaisesti normaalilla soiorakennustekniikalla tehtyyn asuinrakennukseen, voidaan todeta järeän rungon materiaalikustannusten olevan pienemmät kuin normaalilla soiorakenteella tehdyn asuinrakennuksen. Rakenteiden palonkesto paranee, ja rakennuksen keskellä oleva pilari-palkki-linja parantaa tilojen muunneltavuutta. Keskelle tehty pilari-palkki-linja mahdollistaa myös perustusten harventamisen, jolloin säästetään perustamiskustannuksissa. Järeitä lattiapalkkeja käyttäen saadaan lattiarakenne jäykemmäksi.

Taulukko 16. Materiaalikustannusten vertailu järeästä sahatavarasta ja tavallisesta sahatavarasta tehdyn asuinrakennuksen välillä. Järeän sahatavaran materiaalikustannuksiksi oletetaan 1500 mk/m³, normaalin sahatavaran 1000 mk/m³ ja kattoristikon 50 mk/jm.

Table 16. Material costs for a frame made of large dimension timber and for an ordinary construction. Large dimension timber 1500 FIM/m³, normal timber 1000 FIM/m³ and trusses 50 FIM/m.

Rakennustyyppi <i>Type of the frame</i>	Rakenneosa <i>Structural element</i>	Puunenekki <i>Wood consumption</i>	Materiaalikustannukset <i>Material costs</i>
Järeästä sahatavarasta tehty "platform"-rakenteinen asuintalo <i>Frame of large dimension timber, platform construction</i>	Runkotolpat <i>Studs</i> k1200 100 × 125 mm ² Yläjuoksu <i>Top plate</i> 125 × 175 mm ² Alajuoksu <i>Mudsill</i> 75 × 125 mm ² Lattiapalkit <i>Floor beams</i> k1200 125 × 200 mm ² Pilarit <i>Columns</i> k3600 125 × 125+2 × 50 × 125 mm ² Palkit <i>Beams</i> 125 × 275 mm ² Kattopalkit k1200 100 × 225 mm ² Katon sekundäärit k600 50 × 75 mm ²	0,0060 0,0052 0,0033 0,0208 0,0015 +0,0011 0,0054 0,0195 0,0063	Puunenekki <i>Wood consumption</i> Järeä sahatavara 0,0524 <i>Heavy timber</i> 0,0524 Sahatavara <i>Timber</i> 0,0167 m ³ /m ² Materiaalikustannukset <i>Material costs</i> 95 mk/m ²
Normaalista sahatavarasta tehty soiorakenteinen asuintalo <i>Balloon frame made by normal sized timber</i>	Runkotolpat k600 <i>Posts</i> c600 50 × 125 mm ² Yläjuoksu <i>Top plate</i> 75 × 125 mm ² Alajuoksu <i>Mudsill</i> 75 × 125 mm ² Lattiapalkit k600 <i>Floor beams</i> c600 75 × 200 mm ² Kattotuolit k900 <i>Trusses</i> c900 Katon sekundäärit k600 <i>Purlins</i> c600 50 × 75 mm ²	0,0102 0,0033 0,0033 0,0250 0,0063	Puunenekki sahatavara 0,0481 m ³ /m ² <i>Timber</i> 0,0481 m ³ /m ² Kattotuoli <i>Truss</i> 1,1111 jm/m ² Materiaalikustannukset <i>Material costs</i> 104 mk/m ²

Puuvälipohja on kevyt rakenne, minkä takia sen ääneneristys ja värähtely voivat muodostua ongelmaksi. Värähtelyä voidaan vähentää tekemällä rakenne jäykemmäksi sekä jäykistämällä lattiarakennetta poikittaissuunnassa. Ihmisen tuntema häiritsevä taipuma on 2 mm, jonka takia lattiarakenteelle sallitaan pistekuorman 1,5 kN aiheuttamaksi taipumaksi korkeintaan 2,0 mm.

Lattian askelääneneristävyyttä voidaan kasvattaa lattian massaa lisäämällä esimerkiksi valamalla laudoituksen tai vanerin päälle ohut betonikerros (40...50 mm). Perinteisesti lattian massaa on lisätty käyttämällä painoeristettä, joka voi olla esimerkiksi hiekkaa. Ääneneristävyydeltään hyvät lattiat ovat usein puu-betoni-yhdistelmä rakennetta lukuunottamatta monimutkaisia rakenteeltaan.

7 RAKENTEIDEN JA LIITOSTEN KOESTAMINEN

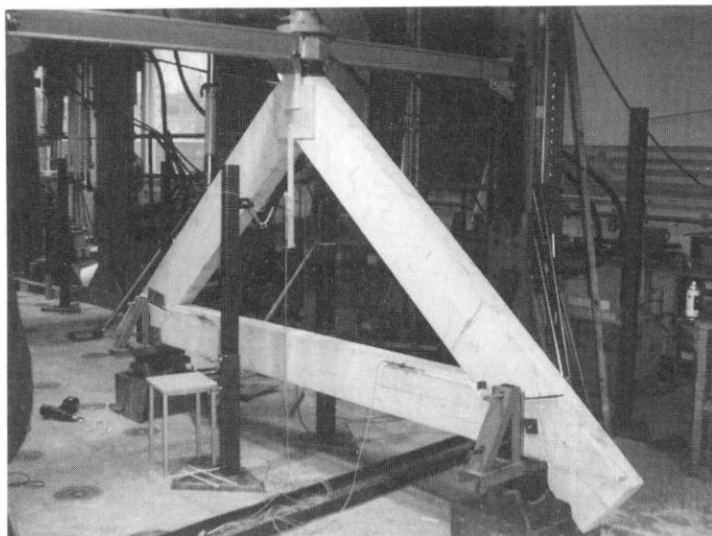
Tutkimuksessa tehtiin alustavia kokeita kahdelle erilaiselle kontaktiliitokselle, vinokulmaiselle loviliiitokselle ja lohenpyrstöliitokselle.

Tutkimuksessa pyrittiin testaamaan liitosten valmistustekniikkaa, selvittämään liitosten murtumismekanismit ja arvioimaan valmistusvirheiden vaikutusta murtokuormaan sekä tarkistamaan esitettyjen mitoitusohjeiden oikeellisuus.

Yläpaarteiden välinen liitos tehtiin naulaamalla 12 mm paksut vanerilevyt ylänurkan molemmin puolin. Sahatavarana käytettiin järeää puuta, jonka paksuus b oli vähintään 100 mm ja korkeus h vaihteli välillä 250...350 mm. Ylä- ja alapaarteiden välistä kulmaa vaihdeltiin, jotta voitiin selvittää kappaleiden välisen kulman vaikutusta liitoksien toimintaan.

Koekappaleet valmistettiin käyttäen normaalia työmaatekniikkaa, jolloin oli mahdollista arvioida myös käytännön valmistustarkkuuden vaikutusta liitosten lujuuteen.

Koekappaleet asetettiin matalille tuille, jotka pyrittiin sijoittamaan rakenteen kannalta optimikohtaan. Optimikohta määräytyi ylä- ja alapaarteiden keskiakselien leikkauspisteen perusteella. Lo-



Kuva 7.1. Kolmioristikoiden koejärjestely.

Figure 7.1 The test arrangement of notched joints.

henpyrstöliitoksin kootun rakenteen tukien sijainti määräytyi räystäsosaan tehdyn loveuksen perusteella. Toinen tuki laakeroitiin. Ylänurkasta rakenteet tuettiin niin, etteivät ne päässeet liikkumaan rakenteen tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa. Kolmioristikoiden koejärjestely on esitetty kuvassa 7.1.

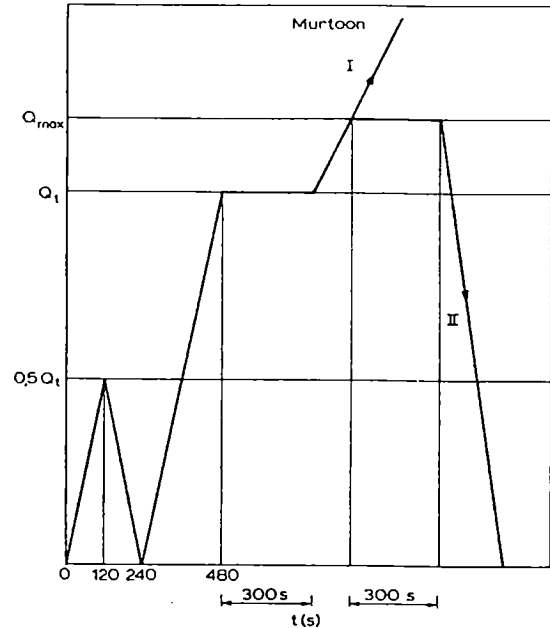
Rakenteita kuormitettiin yhdellä pistekuormalla kuvassa 7.2 esitetyn kuormituskuvaajan mukaisesti. Kuormitusnopeutena käytettiin arvoa $Q_t/240$ s kaikilla kuormitusportailta. Ominaiskuorman Q_t laskennassa oletettiin käytettävän sahatavaran kuuluvan lujuusluokkaan T30 ja kosteusluokkaan 2. Ominaiskuorma laskettiin $100 \times 250 \text{ mm}^2$ kokoisen sahatavaran

suurimpien mahdollisten loveamissyvyyksien perusteella, kun vinokulmaisen loviliitoksen leikkauspituus rajoitettiin välille $200 \leq l_v \leq 300$ mm. Näin voitiin laskea liitoksen kantaman sauvavoiman maksimiarvo aikaluokassa C valituilla lovipinnan kaltevuuksilla. Sauvavoiman S avulla laskettiin rakennetta rasittavan piste-kuorman P suuruus, josta voitiin ratkaista ominaiskuorman arvo kaavoilla (51)-(52). Ominaiskuormat ja vertailukuormat on esitetty taulukossa 7.1.

Taulukko 7.1. Rakenteiden ominaiskuormat ja vaadittavat kuormakestävydet.

Table 7.1 The characteristic loads and the rupture loads for the test structures.

Rakenne <i>The structure</i>	Ominaiskuorma <i>Characreristic load</i> Q_i [kN]	Kuormakestävyys <i>The rupture load</i> Q_{max} [kN]
1	54,07	125,07
2	44,09	104,38
3	31,23	81,50
5	13,55	29,99
6	10,58	25,16



Kuva 7.2. Kolmioristikoiden koestuksessa käytetty kuormituskuvaaja /12/.

Figure 7.2. The loading curve for trusses /12/.

$$P = 1,2 G + 1,6Q \quad (51)$$

$$Q_t = G + Q \quad (52)$$

missä G on rakenteen omapaino

Q on luonnonkuorma, nyt lumikuorma.

Koekuormituksessa saatuja murtokuorman arvoja verrattiin kuorman vertailuarvoon Q_{max} , joka on rakenteelta vaadittava kuorman kestävyys, ja lasketaan kaavalla (53)

$$Q_{max} = 1,3k_c (0,2G + 1,2F + F_d) / k_t \quad (53)$$

missä F on omaan painoon verrattava kuorma, esim. liittyvien rakenteiden paino

F_d on hyötykuorman laskenta-arvo

k_t on määrävimmän kuormitusyhdistelmän aikavaikutuskerroin, tässä tapauksessa aikaluokan B aikavaikutuskerroin

k_c on kuorman aikaluokan C aikavaikutuskerroin.

7.1 Vinokulmaisoin loviliitoksin koottu kolmioristikko

Rakenteissa 1-3 ala- ja yläpaarteet liitettiin vinokulmaisoin loviliitoksin. Rakenteiden vastakkaisissa nurkissa vaihdettiin lyhyen lovipinnan kaltevuuden arvoa niin, että nurkan 1 lovipinnan kaltevuus pyrittiin kaikissa rakenteissa tekemään mahdollisimman lähelle optimikulmaa $\phi = \alpha/2$. Nurkan 3 lyhyen lovipinnan kaltevuuden annettiin poiketa optimista. Rakenteiden ja liitoksien suunnitelmien mukaiset mitat on esitetty taulukossa 7.2 ja käytetyt merkinnät kuvassa 7.3.

Taulukko 7.2. Rakenteiden 1-3 suunnitelmien mukaiset mitat.

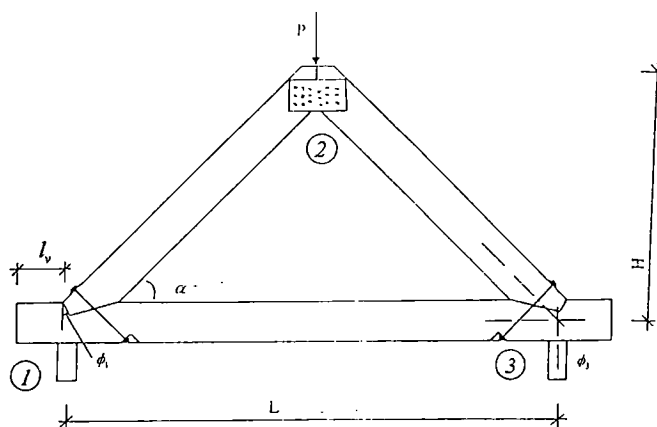
Table 7.2 The designed dimensions of the test structures.

Rakenne Construction Nurkka Corner	Ala-paarre Lower chord [mm ²]	Ylä-paarre Top chord [mm ²]	H [mm]	L [mm]	Jänne- väli Span [mm]	α [°]	ϕ [°]	t_v [mm]	A_c [mm ²]	l_v [mm]	A_v [mm ²]	
1	1	115×345	127×278	1753	3647	3120	45	22,5	36	4370	261	30015
	3		120×296					30,0	43	4945	286	32890
2	1	102×245	97×303	1394	3780	3130	38	19,0	37	3783	294	29988
	3		91×255					13,0	43	40004	268	27336
3	1	126×250	123×250	1075	3710	3200	30	15,0	25	3198	252	31752
	3		128×250					30,0	35	5040	252	31752

7.1.1 Kolmioristikoiden valmistus

Rakenteessa 1 sekä ylä- että alapaarre lovettiin moottorisahalla. Valmistus aloitettiin mittaamalla alapaarre ja merkitsemällä mitoituksen mukaiset loveukset alapaarteeseen. Tähän kului aikaa noin 10 minuuttia. Alapaarre sahattiin valmiiksi 20...25 minuutissa. Sahausjälki oli melko epätasaista, ja loveuksen tekeminen yhtä korkeaksi kummaltakin puolelta alapaarretta osoittautui hankalaksi. Lisäksi loveuksen nurkka oli vaikea tehdä niin, ettei lyhyen lovipinnan sahaus ulottunut liian pitkälle.

Yläpaarteiden valmistus aloitettiin merkitsemällä kattokaltevuuden vaatimat ylänurkan sahausket, ja tekemällä ne. Tähän kului aikaa noin 15 minuuttia, jonka jälkeen yläpaarteet asetettiin maahan ylänurkat vastakkain ja alapaarre näiden päälle. Rakenne mitattiin suunnitelmien mukaiseksi, ja yläpaarteiden alapäiden muoto merkittiin alapaarteen valmiiden lovien avulla. Yläpaarteiden alanurkat sahattiin. Rakenteen mittaamiseen ja yläpaarteiden sahaamiseen kului aikaa noin 25 minuuttia, jonka jälkeen kattotuoli oli valmis koottavaksi.



Kuva 7.3. Testattu rakenne ja käytettävät merkinnät.
Figure 7.3. The tested structure and the symbols

Rakenteiden 2 ja 3 valmistus aloitettiin mittaamalla yläpaarteet mitoituksen mukaisiksi ja sahaamalla ne vannesahalla. Tämän jälkeen alapaarre asetettiin maahan ja yläpaarteet sen päälle. Rakenne mitattiin, ja alapaarteeseen piirrettiin lovet yläpaarteiden mukaan. Alapaarre sahattiin moottorisahalla. Ajallisesti vannesahan käyttö ei vaikuttanut liitoksen valmistukseen.

Vinokulmaisen loviliitoksen valmistus moottorisahalla todettiin suhteellisen nopeaksi ja helpoksi tehtäväksi. Valmistuksen helppous ja tarkkuus riippui kuitenkin sahaajan ammattitaidosta. Vannesahalla tehtyjen lovien tarkkuus oli parempi kuin moottorisahalla tehtyjen. Yhden kattotuolin rakenneosien valmistukseen kului aikaa noin 70...75 minuuttia. Työtä hidasti se, että kaikkiin nurkkiin tehtiin erilaiset loveukset. Kun loveukset ovat samanlaiset, voidaan valmistusta nopeuttaa sabluunojen avulla. Loveusten teko nopeutuu myös kokemuksen lisääntyessä. Mitään erityisvälineitä rakenneosien valmistuksessa ei tarvittu.

Kun kaikki rakenneosat olivat valmiit, koottiin rakenteet. Rakenneosat asetettiin maahan niin, että liitokset olivat mahdollisimman tiukat. Liitoksia ei kiilattu. Ylänurkkaan naulattiin vanerilevyt ja rakenne nostettiin pystyyn. Ylä- ja alapaarteiden läpi porattiin kohtisuoraan pitkän lovipinnan keskipistettä vasten reikä pulttia varten. Ennen pultin asennusta lovettiin yläpaarre pultin aluslevyn vaatimalta alalta. Pulttina käytettiin 10 mm paksua kierretankoa. Kattotuolin kokoamiseen kului aikaa 20 minuuttia. Rakenteiden toteutuneet mitat on esitetty taulukossa 7.3.

Taulukko 7.3. Rakenteiden toteutuneet mitat ja liitosten toleranssit.

Table 7.3. The dimensions and tolerances of the structures.

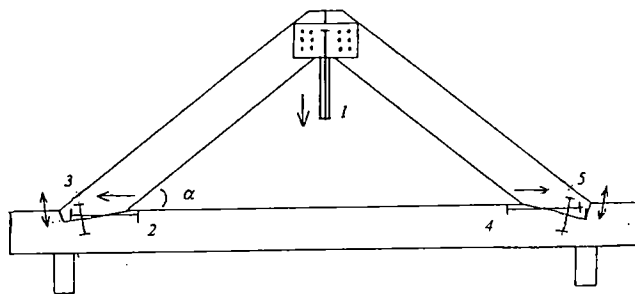
Rakenne Construction Nurkka Corner	Kosteus Humidity [%]	H/L [mm]	Jänne- väli Span [mm]	α [°]	ϕ [°]	t_v [mm]	A_c [mm ²]	l_v [mm]	A_v [mm ²]	Huom!
1. 1		1785/3646	3110	45,6	15,9	49	5750	258	29670	Lyhyt lovipinta auki toisesta reunasta, pitkän lovipinnan ylänurkka auki
3					24,1	64	8050	240	27600	Lyhyen lovipinnan toinen alanurkka ja pitkän lovipinnan toinen ylänurkka kantaa, loveuksen nurkka ylisahattu
2. 1	21.3	1360/3805	3102	37,2	14,9	56	4996	310	31620	Lyhyt lovipinta auki, pitkä lovipinta kantaa toisesta ylänurkasta
3					24,2	52	4368	310	31620	Lyhyt lovipinta auki, pitkä lovipinta kantaa toisesta reunasta
3. 1	21.2	1105/3707	3065	31,1	12,7	38	4920	248	31248	Lyhyt ja pitkä lovipinta kantavat vastakkaisista reunoista
3					21,1	70	5796	270	34020	Lyhyt lovipinta kiinni (yläpaarre alapaarretta lyhyempi), pitkä lovipinta auki

7.1.2 Rakenteiden koestus

Rakenteita kuormitettaessa siirtymiä mitattiin viidellä anturilla, jotka sijoitettiin kuvan 7.4 mukaisesti. Anturilla 1 mitattiin rakenteen ylänurkan painumaa. Anturit 2 ja 4 mittasivat ylä- ja alapaarteiden välisissä liitoksissa tapahtuvia vaakasuuntaisia siirtymiä sekä anturit 3 ja 5 liitoksien pitkää lovipintaa vastaan kohtisuoraan tapahtuvia siirtymiä.

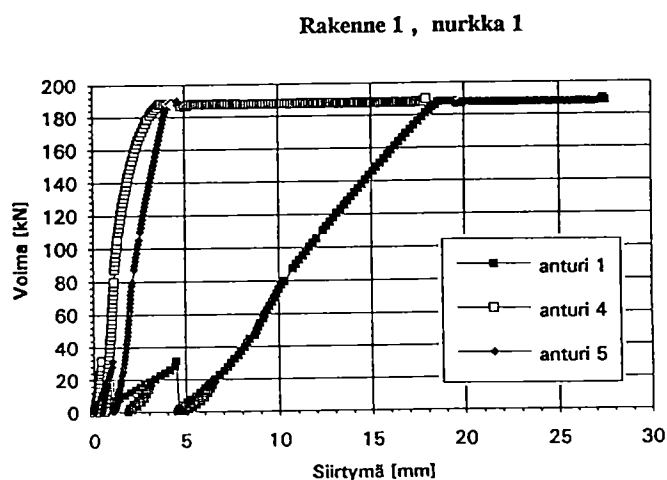
Rakennetta 1 kuormitettiin nopeudella 9,8 kN/min. Kuorma nostettiin aluksi arvoon 19,1 kN, jonka jälkeen se laskettiin alas. Kuvista 7.5 ja 7.6 nähdään, että nurkan 3 vaakasuuntainen alkusiirtymä oli suurempi kuin nurkan 1, mikä johtui nurkan 3 lyhyen lovipinnan suuremmasta alkuväljyydestä. Nostettaessa kuormaa uudestaan ylös syntyi kuorman ollessa 34,9 kN kuormituslaitteistoon häiriö, jonka aikana kuormitus vaihteli välillä 25,1...49,7 kN. Tämän takia kuorma poistettiin. Dynaamisesta kuormituksesta johtuen siirtymät kasvoivat nurkassa 1 pystysuunnassa ja nurkassa 3 vaakasuunnassa. Nurkan 1 pystysuuntainen siirtymä aiheutui melko suuresta alkuväljyydestä pitkällä lovipinnalla.

Dynaamisen kuormituksen jälkeen ylä- ja alapaarteiden väliset liitokset olivat tiukat. Kuormaa nostettiin vakionopeudella arvoon 48 kN, jossa kuorma pidettiin 5 minuuttia. Tänä aikana siirtymät



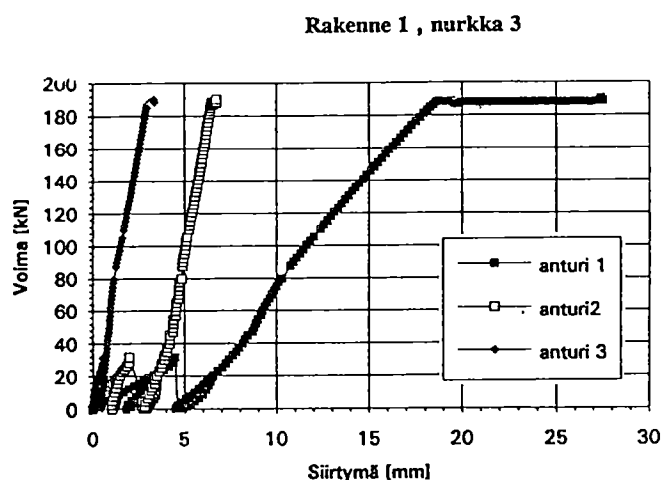
Kuva 7.4. Anturien sijoittaminen rakenteisiin ja mitatut siirtymät.

Figure 7.4. The measuring points and measured deflections.



Kuva 7.5. Voima-siirtymäkuvaajat rakenteen 1 koestuksesta, nurkka 1.

Figure 7.5. The load-deformation curve for structure 1, corner 1.



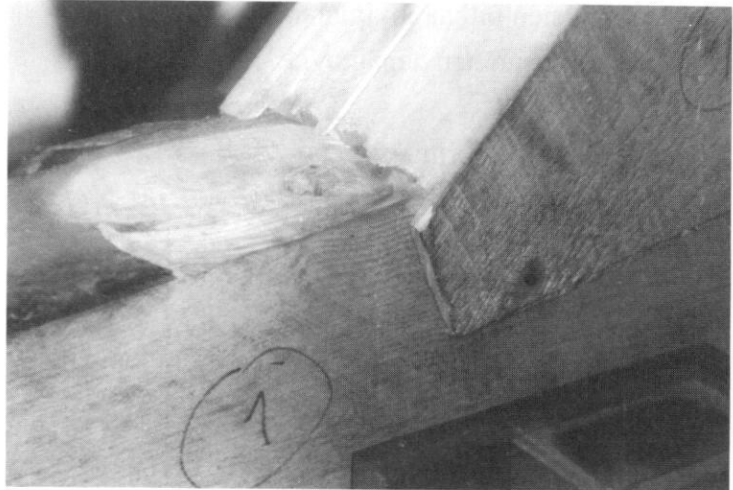
Kuva 7.6. Voima-siirtymäkuvaajat rakenteen 1 koestuksesta, nurkka 3.

Figure 7.6. The load-deformation curve for structure 1, corner 3.

eivät kasvaneet. Kun kuormaa nostettiin edelleen, nopeutui siirtymien kasvu nurkassa 3 kuorman ollessa 80 kN ja nurkassa 1 kuorman ollessa 100 kN. Liitokset olivat kuitenkin varsin jäykät vielä rakenteelta vaaditun kuormakestävyyden $Q_{max} = 125,07$ kN kohdalla, jolloin siirtymät nurkissa olivat vaakasuunnassa 1,6...5,5 mm ja pystysuunnassa 2,0...2,8 mm. Nurkassa 1 pystysuuntainen siirtymä oli suurempi, nurkassa 3 vaakasuuntainen.

Nurkissa tapahtuneet siirtymät pysyivät pieninä kuorman arvoon 189,9 kN asti, jolloin kuormituslaitteiston kapasiteetti loppui. Kuorma pidettiin tässä arvossa 10 minuuttia. Nurkan 1 vaakasiirtymä kasvoi tänä aikana yläpaarteeseen plastisoituessa lyhyellä lovipinnalla ja alapaarteeseen painuessa yläpaarteeseen sisään. Siirtymä kasvoi arvoon 18,1 mm asti, jolloin liitoksen katsottiin murtuneen,

ja kuorma poistettiin rakenteen päältä. Nurkkien lähempi tarkastelu osoitti kuvan 7.7 mukaisesti nurkassa 1 yläpaarteeseen plastisoituneen noin 10...15 mm:n pituudelta lyhyellä lovipinnalla. Nurkassa 3 lyhyt lovipinta oli tasoittunut ylä- ja alapaarteeseen puristuessa toisiaan vasten. Muita murtumisen merkkejä ei liitoksissa ollut havaittavissa.



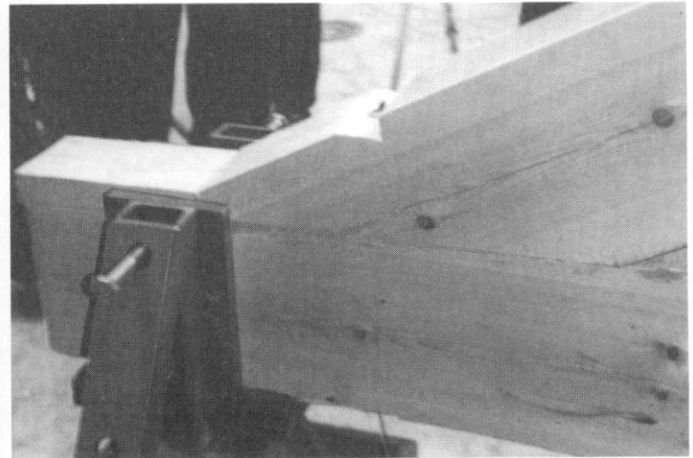
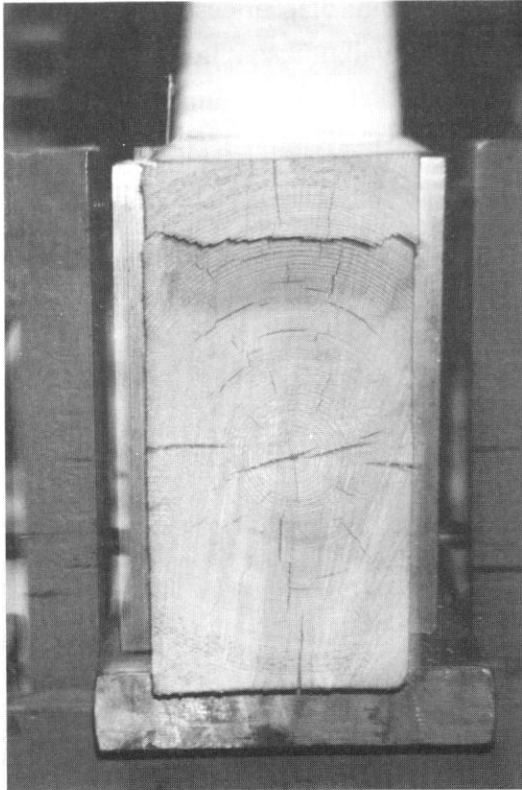
Kuva 7.7. Rakenteen 1 nurkka 1 lyhyen lovipinnan plastisoiduttua.

Figure 7.7 The corner of structure 1 after the deformation of the short side of notch.

Rakenteen 2 kuormitusnopeus oli noin 9,8 kN/min.

Kuorma nostettiin aluksi arvoon 19,0 kN, jonka jälkeen se laskettiin alas. Alkukuormituksen jälkeen kuormaa nostettiin vakionopeudella arvoon 44 kN, jossa kuorma pidettiin 5 minuuttia. Tänä aikana siirtymät eivät juurikaan kasvaneet. Liitoksessa tapahtuneet siirtymät olivat pieniä vielä rakenteelta vaaditun kuormakestävyyden $Q_{max} = 104,38$ kN kohdalla. Kuorman ollessa 135,9 kN alkoi yläpaarre plastisoitua nurkassa 1 lyhyeltä lovipinnalta. Tällöin kuorma poistettiin.

Tarkasteltaessa liitoksia todettiin myös nurkan 3 lyhyen lovipinnan plastisoituneen. Lisäksi nurkissa 1 ja 3 pitkän lovipinnan ylänurkka plastisoitui, sillä rakenteen ylänurkan painuessa alkoi pitkän lovipinnan ylänurkka kantamaan. Mikäli pitkä lovipinta ei olisi plastisoitunut, olisi yläpaarre vipuvaikutuksen takia pyrkinyt liukumaan lyhyttä lovipintaa pitkin, ja leikkauspinnan syitä vastaan kohtisuora vetojännitys olisi ylittynyt. Koska rakenne murtui plastisoitumalla, oli rakenteen kantokyky jäljellä murtokuormaa pienemmillä kuormilla. Nyt rakenne haluttiin saada murtumaan liitoksen leikkauslujuuden ylittyessä, jolloin nurkan 1 leikkauspituutta lyhennettiin. Nurkkaan 1 tehtiin moottorisahalla liitoksen lovisyvyyttä syvempi sahaus 73 mm:n päähän alapaarteeseen päästä, jolloin uusi leikkauspituus l_1 oli 238 mm.

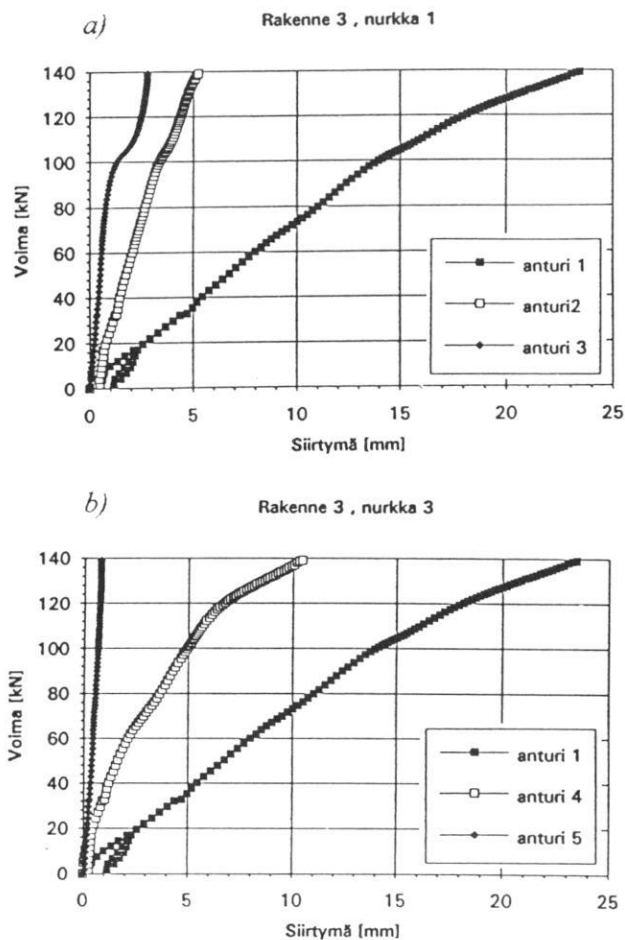


Kuva 7.8. Rakenteen 2 nurkka 3 leikkausmurron tapahduttua.
Figure 7.8. The corner 3 of structure 2 after the shear failure.

Nyt rakennetta kuormitettiin vakionopeudella 9,8 kN/min kunnes rakenne murtui kuorman arvolla $F_{murto} = 111,0$ kN. Murto tapahtui äkillisesti nurkan 1 leikkautuessa kuvan 7.8 mukaisesti. Tämä aiheutti rakenteeseen suuren kulmanmuutoksen, jolloin myös nurkka 3 murtui ennen kuin kuorma ehdittiin poistaa rakenteen päältä. Nurkka 3 murtui poikittaisen vedon ja leikkausvoiman yhteisvaikutuksesta.

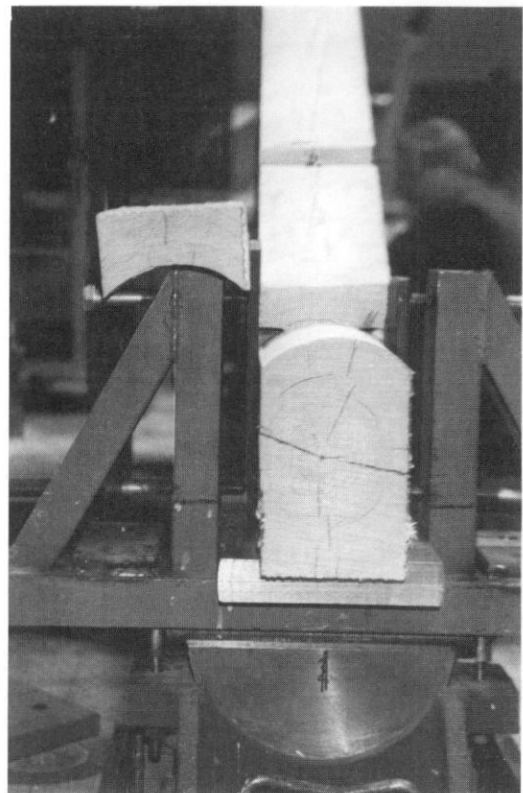
Rakennetta 3 kuormitettiin nopeudella 9,0 kN/min. Kuorma nostettiin aluksi arvoon 16,7 kN, jonka jälkeen se laskettiin alas. Nurkan 3 vaakasuuntainen alkusiirtymä oli suurempi kuin nurkan 1, huolimatta nurkan 1 suuremmasta alkuväljyydestä lyhyellä lovipinnalla. Alkukuormituksen jälkeen lovipinnoilla olleet raot olivat pientyneet. Kuormaa nostettiin vakionopeudella arvoon 32 kN, jossa se pidettiin 5 minuuttia. Tänä aikana siirtymät eivät kasvaneet. Kun kuormaa nostettiin edelleen, nopeutui siirtymien kasvu nurkassa 3 kuorman ollessa noin 60 kN ja nurkassa 1 vasta kuorman ollessa noin 100 kN. Rakenteelta vaaditun kuormakestävyyden $Q_{max} = 81,5$ kN kohdalla vaakasiirtymä oli 2,7...3,8 mm ja pystysiirtymä 0,8...0,6 mm. Nurkassa 1 pystysuuntainen siirtymä oli hieman suurempi kuin nurkassa 3. Nurkassa 3 vaakasuuntainen siirtymä oli suurempi. Rakenteen 3 voima-siirtymäkuvaajat on esitetty kuvassa 7.9. Molemmat nurkat olivat jäykkiä kuorman arvoon $F_{murto} = 139,2$ kN asti, jolloin rakenne murtui äkillisesti nurkkien leikkautuessa. Nurkka 3 murtui ensin. Tämä aiheutti rakenteeseen suuren kulmanmuutoksen, jolloin myös nurkka 1 murtui ennen kuin kuorma ehdittiin poistaa. Nurkka 3 leikkautui vuosirenkaan suunnassa, minkä mahdollisti lovinurkan ylisahaus. Lisäksi alapaarteen lyhyt lovipinta oli

pidempi kuin yläpaarteen vastaava pinta, jolloin yläpaarre painui alapaarteeseen. Kun pitkän lovipinnan ylänurkka alkoi kantamaan ja pyrki vipuvaikutuksen takia nostamaan yläpaarretta lyhyellä lovipinnalla, saattoi nurkan 3 leikkautuminen aiheutua osittain leikkauspinnan poikittaisen vetolujuuden ylittymisestä. Pitkän lovipinnan plastisoituminen oli vähäistä. Kuvassa 7.10 on esitetty nurkka 3 murron jälkeen. Nurkka 1 leikkautui normaalisti leikkauspintaa pitkin.



Kuva 7.9. Voimasiirtymä-kuvaajat rakenteen 3 koetuksesta, a) nurkka 1 ja b) nurkka 3.

Figure 7.9 The stress-strain curvature for structure 3, a) corner 1 and b) corner 3.



Kuva 7.10. Rakenteen 3 nurkka 3 leikkausmurron tapahduttua.

Figure 7.10. The corner 3 of the structure 3 after shear failure.

7.1.3 Tulosten analysointi

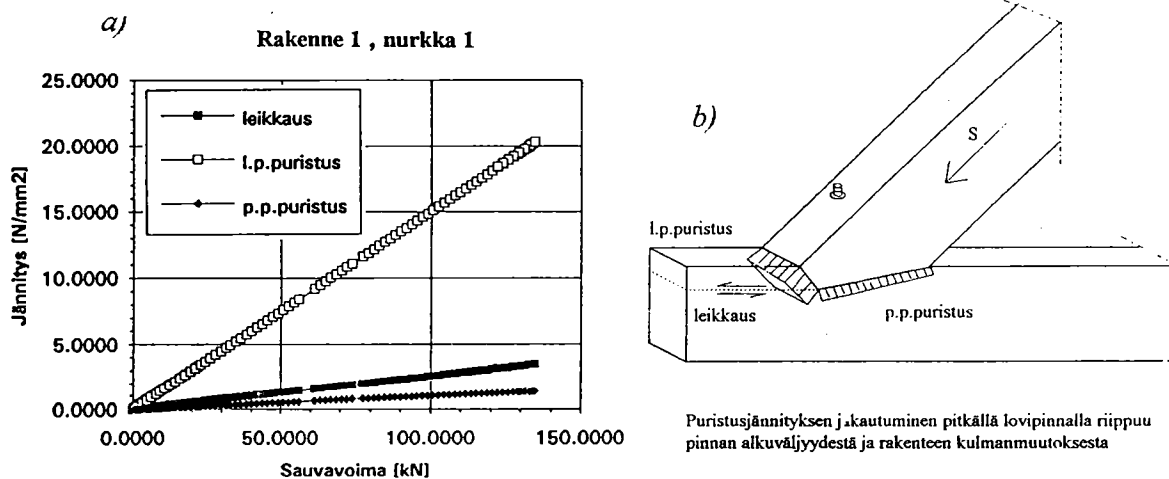
Kaikissa koetetuissa rakenteissa murtokuorma F_{murto} ylitti rakenteilta vaaditun kuormakestävyyden Q_{max} arvon, jolloin liitoksilla oli ylimääräistä kapasiteettia. Myös liitoksissa syntyneet siirtymät olivat melko pieniä murtoon asti. Kokeissa saadut kuormien arvot on esitetty taulukossa 7.4. Erilaisia murtotapoja havaittiin kolme: puristusmurto, leikkausmurto ja leikkausmurto vuosirenkään suunnassa.

Taulukko 7.4. Rakenteiden vertailukuormat, murtokuormat ja sauvavoiman maksimiavot, kappaleiden tiheydet 15 % kosteudessa ja tiheyden mukaan redusoidut murtokuormat sekä murtotavat.

Table 7.4. The comparative loads (Q_{max}), failure loads (F_{murto}) and the maximum values of axial forces (S_{max}), the density 15% (Tiheys) and the failure loads reduced by the density (F_{red}).

Rakenne Construction	Q_{max} [kN]	F_{murto} [kN]	S_{max} [kN]	Tiheys [kg/m ³]	F_{red} [kN]	Murtotapa
1	125,1	189,9	134,9	419	181,3	Nurkan 1 liitos murtui yläpaarteen plastisoituessa lyhyellä lovipinnalla.
2 a)	104,4	135,9	118,5	419	129,7	Nurkan 1 liitos murtui ala- ja yläpaarteen plastisoituessa lyhyellä lovipinnalla.
b)	84,8	111,0	96,8	452	98,2	Nurkan 1 liitos murtui leikkautumalla leikkauspintaa pitkin.
3	81,5	139,2	136,6	500	111,7	Nurkan 3 liitos murtui leikkautumalla vuosirenkaan suunnassa.

Rakenne 1 murtui yläpaarteen puristuslujuuden ylittyessä lyhyellä lovipinnalla nurkassa 1. Lyhyen lovipinnan kaltevuus poikkesi suunnitelmista ollen suunniteltua pienempi, jolloin yläpaarteen puristuslujuus lovipinnalla oli oletettua pienempi. Lyhyen lovipinnan puristusjännitys oli suurimmillaan 20,50 N/mm². Tällöin yläpaarte plastisoitui. Leikkausjännitys oli suurimmillaan 3,50 N/mm², ja leikkauspinnalla sijainnut oksa vahvasti leikkauspintaa. Pitkän lovipinnan puristusjännitys oli pieni, eikä lovipinnan ylänurkka plastisoitunut, sillä ylänurkassa oli alunperin noin 10...15 mm:n rako. Nurkan 1 jännityskuvaajat on esitetty kuvassa 7.11.

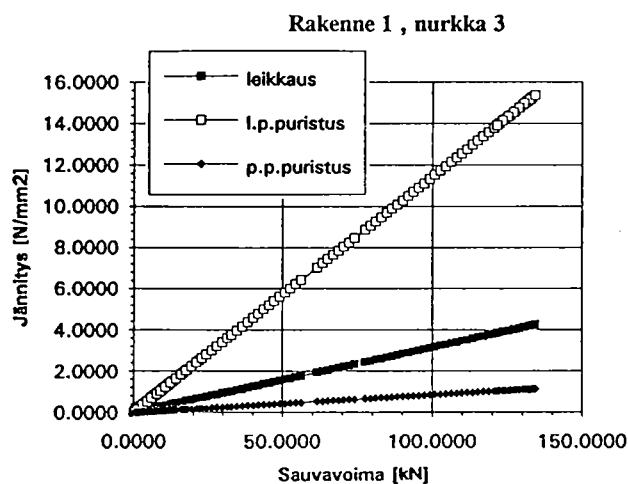


Kuva 7.11. a) Rakenteen 1 nurkan 1 jännitykset liitoksessa ja b) jännitysten jakautuminen lovipinnoilla.
Figure 7.11 a) The stresses of the corner 1 in the structure 1 and b) distribution of the stresses in the notched sides.

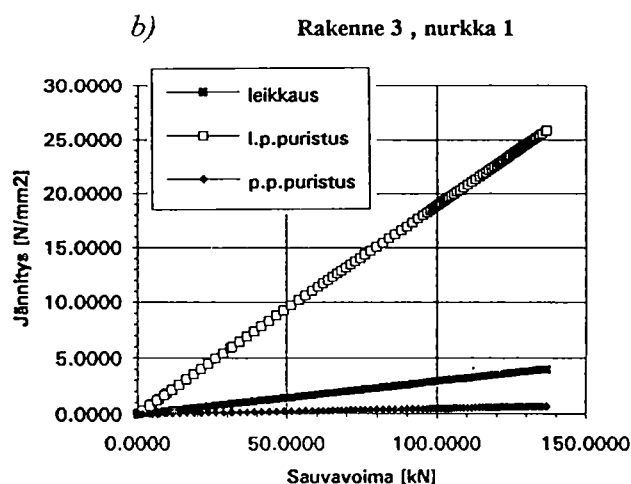
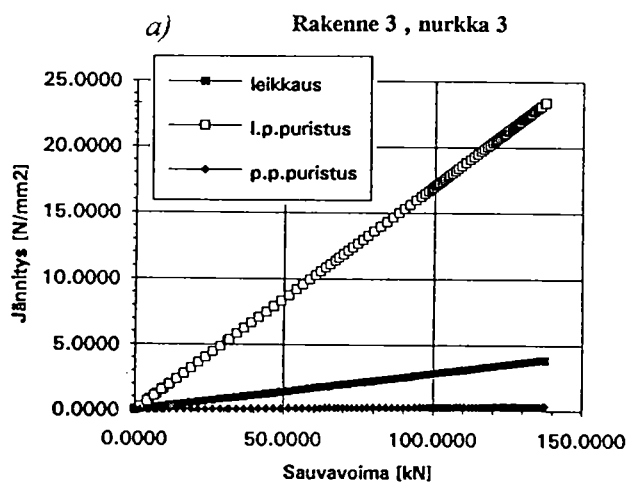
Rakenteen 1 nurkka 3 ei murtunut, vaan liitoksen lyhyt lovipinta tasoittui ala- ja yläpaarteen puristuessa toisiaan vasten. Nurkassa 3 lyhyen lovipinnan kaltevuus oli hyvin lähellä optimiarvoa. Tällöin lovipinnalla vaikuttava kuvan 7.12 mukainen puristusjännitys 15,60 N/mm² oli pienempi kuin pinnan puristuslujuus 18,23 N/mm². Myös pitkän pinnan puristusjännitys oli pieni. Leikkauspinnalla vaikuttava leikkausjännitys oli jopa 4,28 N/mm².

Rakenteen 2 nurkka 1 murtui myös plastisoitumalla. Lyhyt lovipinta oli suunniteltua jyrkempi, jolloin lovipinnan puristusjännitys $20,37 \text{ N/mm}^2$ ylitti yläpaarten puristuslujuuden $19,18 \text{ N/mm}^2$. Nurkassa 3 lyhyen lovipinnan kaltevuus oli suunnitelmien mukainen. Vaikka alapaarten puristuslujuus oli loivasta lovipinnasta johtuen huono, oli lovipinnan plastisoituminen kuitenkin vähäistä. Kummassakin nurkassa pitkän lovipinnan ylänurkka plastisoitui. Pitkät lovipinnat olivat valmistuksen epätarkkuuksista johtuen auki läheltä loveuksen kärkeä siten, että rako pieneni lovipinnan ylänurkkaa kohti. Kun rakenteen 2 nurkan 1 leikkauspintaa lyhennettiin, saatiin rakenne murtumaan nurkan 1 leikkautuessa jännityksen arvolla $3,40 \text{ N/mm}^2$ leikkauspintaa pitkin lovisyvyydeltä. Nurkan 1 leikkautuessa rakenteeseen syntyi suuri kulmanmuutos, jolloin myös nurkka 3 murtui leikkauspintaa pitkin leikkausvoiman ja poikittaisen vedon yhteisvaikutuksesta. Leikkausmurto tapahtui äkillisesti.

Rakenteessa 3 ala- ja yläpaarteiden välinen kulma oli pieni, jolloin liitokseen vaikuttava vaakavoima oli suuri. Rakenne murtui nurkan 3 leikkautuessa vuosiin suunnassa. Tämän mahdollisti lyhyen lovipinnan ylisahaus. Lovipinnan ylisahausta kokeiltiin keinona pienentää loven kärkeen syntyvää jännityshuippua. Liitoksen oletetulla leikkauspinnalla vaikuttava leikkausjännitys oli murtotilanteessa $3,83 \text{ N/mm}^2$, mutta todellisella leikkauspinnalla se oli $3,40 \text{ N/mm}^2$. Nurkan 3 murtumiseen vaikutti osittain myös leikkauspinnalle syntynyt poikittai-



Kuva 7.12. Rakenteen 1 nurkan 3 liitoksen jännitykset.
Figure 7.12 The stresses in the corner 3, structure 1.

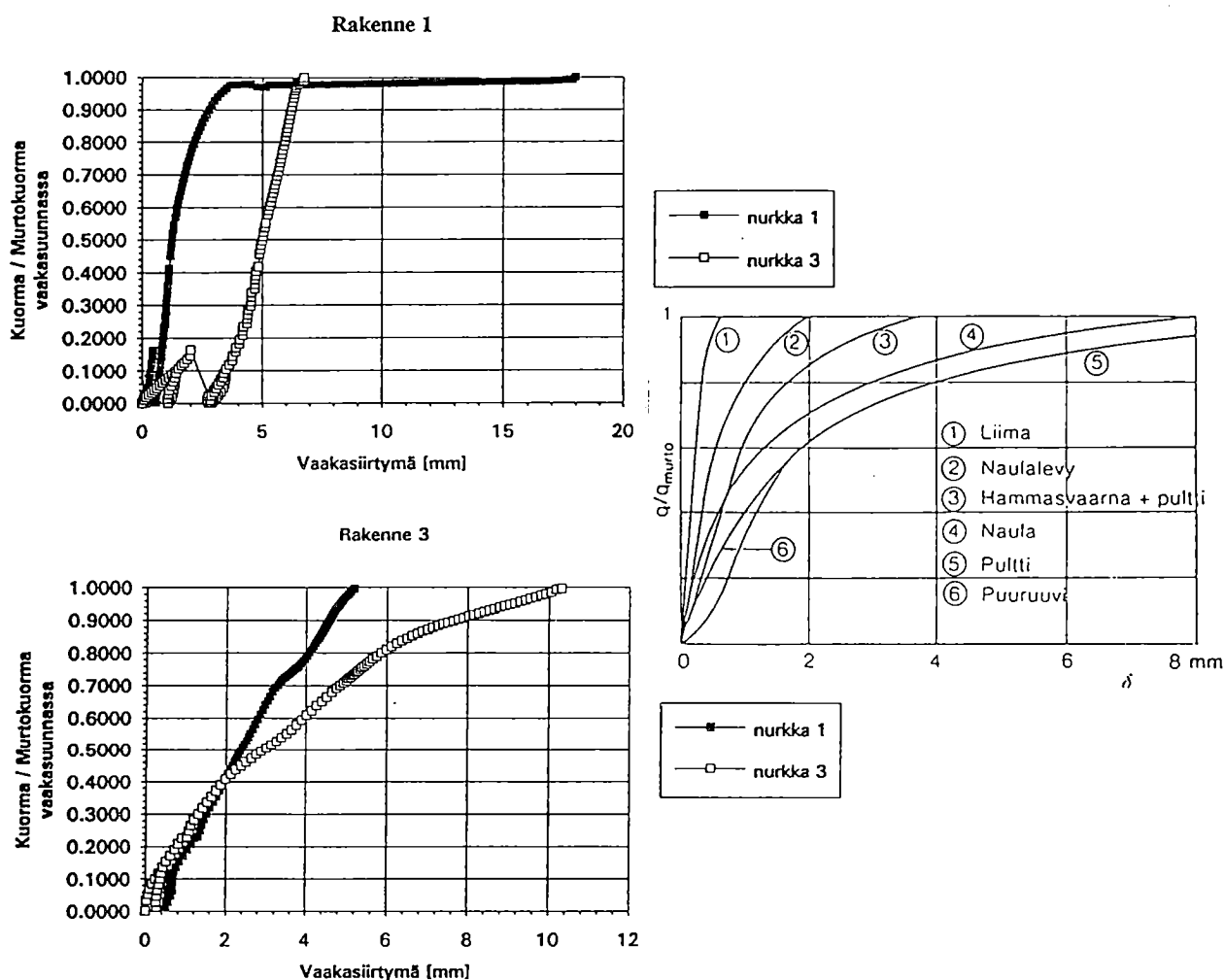


Kuva 7.13. Rakenteen 3 a) nurkan 3 ja b) nurkan 1 jännitys-jakauma.

Figure 7.13. Distribution of the stresses, structure 3 a) corner 3 b) corner 1.

nen vetojännitys, jonka aiheutti yläpaarteen pyrkimys nousta lyhyttä lovipintaa pitkin. Yläpaarteen nousun esti kitkan lisäksi alapaarteen plastisoituessa lyhyelle lovipinnalle syntynyt pykälä, jonka yli yläpaarre ei päässyt liukumaan. Lyhyt lovipinta oli suunniteltua jyrkempi, mutta kuitenkin niin loiva, että puristusjännitys $23,33 \text{ N/mm}^2$ ylitti alapaarteen puristuslujuuden $19,85 \text{ N/mm}^2$ ja alapaarre plastisoitui. Rakenteen 3 nurkka 1 murtui leikkautumalla nurkan 3 murruttua. Nurkan 1 liitos murtui leikkauspintaa pitkin lovisyvydel-
tä. Rakenteen 3 nurkkien jännitysjaakaumat on esitetty kuvassa 7.13.

Kaikissa koestetuissa rakenteissa liitoksissa tapahtuneet siirtymät olivat alkuväljyyksistä huolimatta pieniä murtoon asti. Kun vinokulmaisen loviliitoksen jäykkyyttä verrataan kuvan 7.14 mukaisesti mekaanisin liittimin tehtyihin liitoksiin, voidaan tämän koesarjan perusteella todeta vinokulmaisen loviliitoksen sijoittuvan jäykkyydeltään hammasvaarna- ja naulaliitoksi-
en välille. Vinokulmaisen loviliitoksen jäykkyys kasvaa, kun liitettävien kappaleiden välinen



Kuva 7.14. Mekaanisin liittimin tehtyjen liitoksien jäykkyys /9/ sekä rakenteiden 1 ja 3 vinokulmaisten loviliitosten jäykkyydet. Kuvaajien pystyakselina on kuorma/murtokuorma ja vaaka-akselina siirtymä. Jotta vinokulmaisten loviliitoksien koestuksessa saadut tulokset olisivat vertailukelpoisia, on kuorman arvona käytetty liitokseen vaikuttavan voiman vaakakomponenttia ja siirtymänä liitoksessa tapahtunutta vaakasiirtymää.

Figure 7.14 Load slip curves for mechanical joints /9/ and tested structures 1 and 3.

kulma kasvaa. Koestuksessa havaittiin myös liitoksen ominaisuuksien paranevan kuormituksen myötä liitoksessa olevien rakojen pientyessä. Mikäli liitosta joudutaan vahvistamaan, on vahvistusmenetelmän oltava yhtä jäykkä kuin vinokulmainen loviliitos.

7.1.4 Johtopäätökset

Vinokulmaisen loviliitoksen valmistus moottorisahalla oli suhteellisen helppoa ja nopeaa. Yhden kolmioristikon valmistamiseen kului 90...95 minuuttia aikaa. Valmistustarkkuus oli melko huono, mikä johtui sekä mittauksien vaikeudesta että käytetystä karkeasta valmistustekniikasta. Mittausta voidaan helpottaa käyttämällä valmiita sabluunoja, joiden avulla loveukset merkitään tarkasti paikoilleen. Merkinnöistä huolimatta lyhyt lovipinta oli vaikea tehdä oikeaan kaltevuuteen, jolloin se yleensä oli suunniteltua jyrkempi. Tällöin yläpaarteen puristuslujuus lyhyellä lovipinnalla oli oletettua pienempi. Alapaarteen loveuksen kärki on helpointa tehdä poraamalla loven kärkeen reikä ja sahaamalla sen jälkeen lovipinnat reikään asti. Tällöin loven ylisahauksen vaara vähenee, ja loveuksen kärkeen syntyvä jännityshuippu tasoittuu kärjen pyöristyessä.

Pitkän pinnan sahausta voidaan helpottaa kappaleen kylkiin kiinnitettävillä ohjureilla. Lisäksi käytettäessä vinokulmaista loviliitosta rakenteissa, joissa liitettävät kappaleet taipuvat, tulee pitkä lovipinta sahata niin, että sen ylänurkka on noin 10 mm auki. Tällöin liitettävillä kappaleilla on varaa painua ilman, että liitoksen kantokyky vaarantuu.

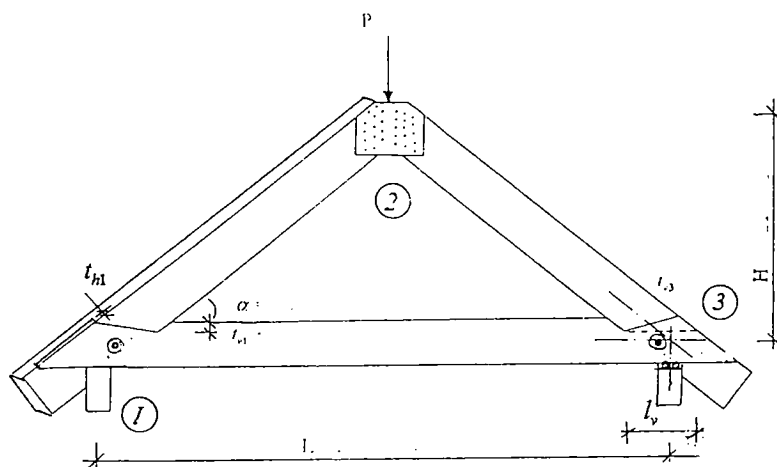
Tutkimusta varten tehdyt kolmioristikot olivat kooltaan noin 1/3 todellisista rakenteista. Tehtäessä täysimittaisia rakenteita hidastaa rakenneosien koko ja paino valmistusta. Tällöin on helpointa käyttää valmistustekniikkaa, jossa rakenneosat pysyvät paikoillaan ja sahaa liikutetaan. Käyttökelpoisia työvälineitä ovat mm. pistosaha ja moottorisaha.

Kaikissa koestetuissa rakenteissa liitoksissa tapahtuneet siirtymät olivat valmistuksen epätarkkuuksista riippumatta pieniä murtoon asti (vaakasuunnassa 3,5...10,7 mm ja pystysuunnassa 1...4 mm). Liitokset olivat alkuväljyyksistä huolimatta lähes yhtä jäykkä kuin vaarnaliitokset. Lisäksi kokeissa saadut murtokuormat F_{murto} olivat 1,3...1,7 kertaa suurempia kuin vertailukuormat Q_{max} , vaikka lyhyen lovipinnan kaltevuus poikkesi kaikissa liitoksissa suunnitellusta. Moottorisahaa käyttämällä voidaan liitos valmistaa riittävällä tarkkuudella.

Liitoksilla havaittiin kolme erilaista murtomekanismia. Liitoksen murtomekanismina oli puristusmurto liitettävien kappaleiden välisen kulman ollessa suuri, kun taas pienemmillä kulmilla liitos murtui leikkautumalla. Liitoksen murtuessa plastisoitumalla tapahtui murtuminen hitaasti siirtymien kasvaessa vakiovoimalla. Mikäli kuorma poistettiin plastisoitumisen tapahduttua, oli rakenne vielä käyttökelpoinen pienemmillä kuormilla. Leikkausmurto tapahtui hyvin äkillisesti ja rikkoi rakenteen kokonaan. Leikkausmurtotapoja oli kaksi: leikkautuminen suoraan leikkauspintaa pitkin ja leikkautuminen vuosirenkaan suunnassa. Oletetulla leikkauspinnalla saatiin suurempi leikkauslujuuden arvo, kun leikkautuminen tapahtui vuosirenkaan suunnassa, mutta todellisilla leikkauspinnoilla leikkauslujuus oli lähes yhtä suuri kummassakin tapauksessa. Murtuminen vuosirenkaan suunnassa saattoi aiheutua osittain poikittaisen vetolujuuden ylittymisestä. Lisäksi kyseisen murtomekanismin mahdollisti lyhyen lovipinnan ylisahaus.

7.2 Lohenpyrstöliitoksin koottu kolmioristikko

Rakenteissa 5 ja 6 sauvat liitettiin lohenpyrstöliitoksin. Testattu rakenne ja käytetyt merkinnät on esitetty kuvassa 7.15. Molempien rakenteiden vastakkaisissa nurkissa vaihdettiin alapaarten lovisyvyyden arvoa siten, että nurkassa 1 loveus tehtiin käyttäen lovisyvyyden t_{v2} arvona syvyyttä $h/4$. Nurkan 3 alapaarten lovisyvyytenä käytettiin arvoa $h/3$. Koestettavat rakenteet poikkesivat normaaleista kattotuolirakenteista lyhyen räystäösosansa takia.



Rakenne Construction	Ala- paarre Lower chord [mm ²]	Ylä- paarre Top chord [mm ²]	H [mm]	L [mm]	Jänne- väli Span [mm]	α [°]	t_{h1} [mm]	t_{h2} [mm]	t_{v2} [mm]	A_c [mm ²]	l_v [mm]	A_v [mm ²]
5. 1	100 × 255	101 × 301	1514	4035	3130	38	33	50	63	13530	489	31541
3		103 × 301					33	50	83	12804	489	36431
6. 1	123 × 280	145 × 280	1248	4290	3200	30	35	62,5	70	16660	560	39200
3		145 × 280					35	62,5	93	14070	560	45640

Kuva 7.15. Lohenpyrstöliitosten avulla tehtävät kolminivelkannatteet ja käytettävät merkinnät.
Figure 7.15. Dimensions for the constructions with tension notch joints and the symbols.

7.2.1 Kolmioristikoiden valmistus

Rakenteiden valmistus aloitettiin mittaamalla ja sahaamalla yläpaarteiden ylänurkka suunnitellun kattokaltevuuden mukaiseksi (20 min.). Yläpaarteet asetettiin ylänurkat vastakkain maahan ja alapaarre näiden päälle. Kattotuoli mitattiin suunnitelmien mukaiseksi, ja ala- sekä yläpaarteisiin merkittiin nurkkaliitosten sijainti. Alapaarteeseen merkittiin lisäksi lohenpyrstön mitat (20 min).

Alapaarten valmistus aloitettiin sahaamalla kumpaankin päähän lohenpyrstön muoto (15 min.). Alapaarten syvyysuuntaisten loveuksien valmistuksessa käytettiin moottorisahaa, johon oli kiinnitetty rajoittimet lovisyvyyden säätelyä varten. Loveukset valmistettiin kuvan 7.16 mukaisesti tekemällä moottorisahalla lovettavalle alueelle rajoittimen sallimaan lovisyvyyteen asti viiltoja. Puusuikaleet lyötiin pois taltan avulla, ja lovipinta tasoitettiin

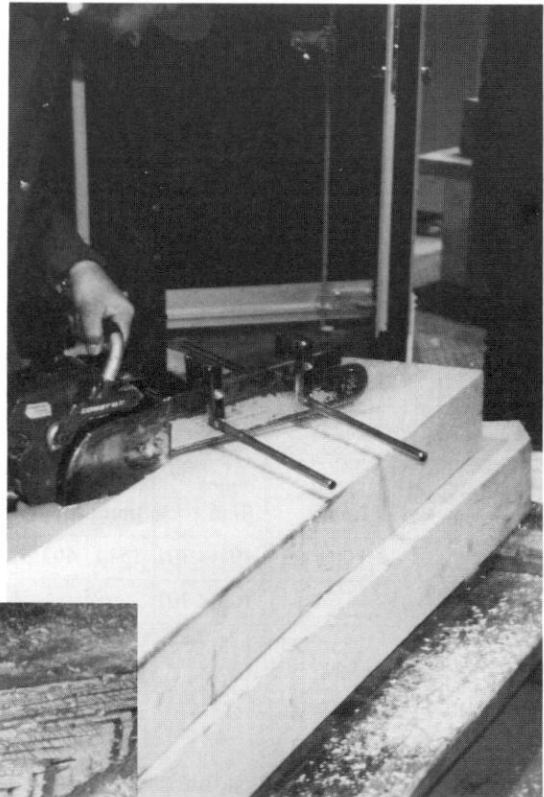
moottorisahalla. Yhden loveuksen tekoon kului aikaa alussa lähes 30 minuuttia, mutta harjaantumisen myötä työnopeus kasvoi niin, että loveus valmistui 20 minuutissa. Työtä hidasti liian lyhyt moottorisahan terä, jolloin koko loveusta ei voitu sahata kerralla, vaan jouduttiin tekemään sahaus erikseen kummaltakin puolelta loveusta. Lopuksi sahattiin alapaarteiden päät pois yläpaarteiden reunan mukaan piirrettyä viivaa pitkin.

Kun alapaarre oli valmis, asetettiin se uudestaan yläpaarteiden päälle. Lohenpyrstön mitat piirrettiin alapaarteiden mittojen mukaan yläpaarteisiin, jolloin saatiin tarkat mitat yläpaarteiden loveusta varten. Lopuksi lovettiin yläpaarteet valmiiksi. Loveuksien tekoon kului 20...30 minuuttia ja mittauksiin 5 minuuttia. Lovet pyrittiin tekemään hieman merkittyä pienemmiksi, jotta liitoksia ei jouduttaisi kiilaamaan.

Rakenneosien valmistukseen kului aikaa 140...180 minuuttia. Työtä voidaan nopeuttaa käyttämällä valmiita sabluunoja sekä pidempää sahanterää, jolloin loveukset voidaan tehdä yhdestä suunnasta valmiiksi.

Kuva 7.16 a) Lovettavan alueen sahaus moottorisahalla, johon on kiinnitetty lovisyvyyttä rajoittavat ohjurit.
b) Puusuikaleiden irrottaminen.

Figure 7.16 a) Sawing the cutting with chainsaw with depth control equipment



b)



a)

Rakenteet koottiin 2 päivää rakenneosien valmistamisen jälkeen, jolloin käytetty ulkokuiva puutavara ehti kuivua niin, että kaikki liitokset olivat löystyneet. Ala- ja yläpaarteiden väliset liitokset kiilattiin tiukoiksi. Kiilaus tehtiin mahdollisuuksien mukaan alapaarteiden alapuolelta, mutta kohdissa, joissa tämä ei ollut mahdollista, tehtiin kiilaus alapaarteiden yläpuolelle. Kiilauksessa käytettiin tasapaksuja metallilevyjä ja koivuvanerikiiloja. Liitosten kiilauksen

jälkeen naulattiin vanerilevyt rakenteen ylänurkan molemmin puolin. Lopuksi porattiin alaja yläpaarteiden läpi reiät pultteja ($d=8$ mm) varten. Pultit sijoitettiin niin, etteivät ne pienentäneet alapaarten leikkauspinnan alaa. Yhden rakenteen kokoamiseen kului aikaa 35...45 minuuttia kiilausten määrästä riippuen. Rakenteiden toteutuneet mitat on esitetty taulukossa 7.5.

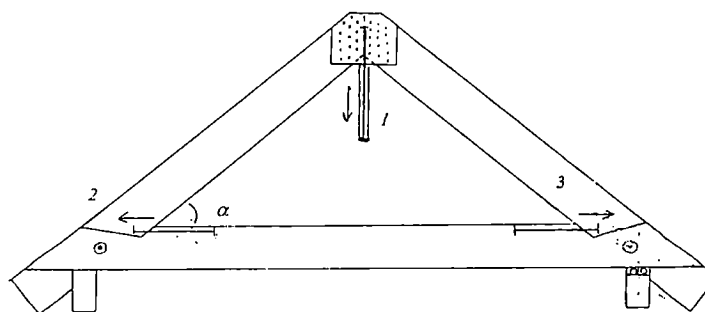
Taulukko 7.5. Rakenteiden toteutuneet mitat ja liitosten toleranssit.

Table 7.5. Dimensions and tolerances of the structures with tension notch joints.

Rakenne Construction Nurkka Conner	Kosteus Humidity [%]	H/L [mm]	Jänne- väli Span [mm]	α [°]	t_{h1} [mm]	t_{h2} [mm]	t_{v2} [mm]	A_c [mm ²]	l_v [mm]	A_v [mm ²]	Huom!
5. 1		1530/ 3876	2894	39	32	51	70	13120	475	31825	Kiilattu alapuolelta vanerilla, yläpuolella 2 mm rako
3					32	47	89	12416	480	36720	Kiilattu yläpuolelta teräslevyllä, alapuolella rako
6. 1	22,8	1115/ 4326	3065	28	40	58	81	19040	560	45080	Kiilattu yläpuolelta kiilattulla vanerilla, alapaarriin liian lyhyt
3					40	58	102	16080	550	50050	Kiilattu yläpuolelta kiilattulla vanerilla ja alapuolelta teräslevyllä, alapaarriin liian lyhyt

7.2.2 Rakenteiden koestus

Rakenteita kuormitettaessa mitattiin siirtymiä kolmella anturilla, jotka sijoitettiin kuvassa 7.17. mukaisesti. Anturilla 1 mitattiin rakenteen ylänurkan siirtymää. Anturit 2 ja 3 mittasivat ylä- ja alapaarten välisissä liitoksissa tapahtuvia vaakasuuntaisia siirtymiä.



Kuva 7.17. Anturien sijoittaminen rakenteisiin ja mitatut siirtymät
Figure 7.17. Figure 73. The measuring points and directions.

Rakennetta 5 kuormitettiin nopeudella 9,5 kN/min. Voima nostettiin aluksi arvoon 15,6 kN, jonka jälkeen se laskettiin takaisin alas. Syntyneet alkusiirtymät olivat samaa suuruusluokkaa kuin vinokulmaisten loviliitosten koestuksessa. Tämän jälkeen kuormaa nostettiin vakionopeudella arvoon 31,9 kN, jossa kuorma pidettiin 5 minuuttia. Vinokulmaisista loviliitoksista poiketen lohensyrystöliitoksen siirtymät kasvoivat vakiokuorman aikana, jolloin mitoituksiin $dx = 5$ mm saavutettiin. Nostettaessa kuormaa uudestaan tapahtui kuorman

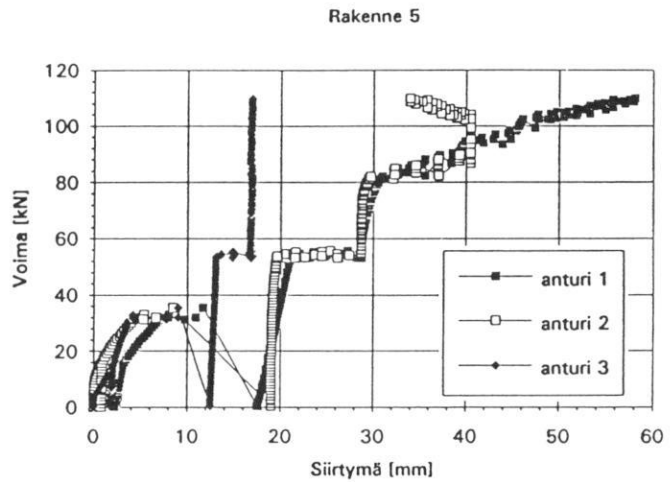
ollessa 35,4 kN kuormituslaitteistosta johtuva häiriö, jonka aikana rakenteen kuormitus vaihteli välillä 15,6...40,3 kN. Tämän takia kuorma poistettiin. Nurkan 1 siirtymä kasvoi dynaamisen kuormituksen aikana noin 10,6 mm ja nurkan 3 siirtymä 3,5 mm. Rakenteen voima-siirtymäkuvaaja on esitetty kuvassa 7.18.

Dynaamisen kuormituksen jälkeen kuormaa kasvatettiin vakionopeudella. Liitokset olivat varsin jäykkiä kunnes kuorman arvolla 53 kN tapahtui uusi kuormitushäiriö. Tällöin voima vaihteli välillä 30,5...55,2 kN, eikä kuormaa poistettu. Nurkassa 1 syntyi dynaamisen kuorman vaikutuksesta 5 mm:n siirtymä ja nurkassa 3 1,7 mm:n siirtymä. Kuorman tasaannuttua kasvatettiin sitä edelleen vakionopeudella. Kuorman arvolla 82,1 kN syntyi nurkkaan 1 halkeama. Halkeama syntyi yläpaarten syrjälle, ja yläpaarten räystäösosa lähti leikkautumaan alapaarten alta. Nurkka 3 oli edelleen jäykkä. Rakenteen murtui nurkan 1 räystäösosan leikkautuessa kuvan 7.19 mukaisesti

kuorman arvolla 112,0 kN, jolloin nurkassa 1 syntyneet siirtymät olivat suuret. Murtokuorma oli suurempi kuin rakenteelta vaadittu kuormakestävyys 29,99 kN.

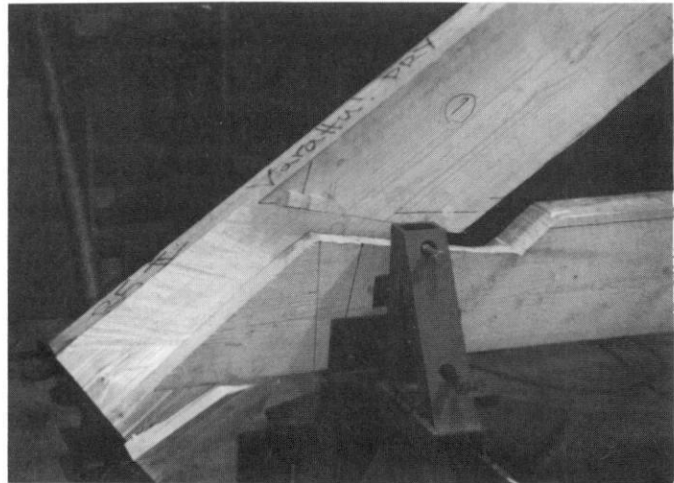
Rakenteen liitosten lähemmän tarkastelun jälkeen voitiin todeta nurkassa 1 alapaarten plastisoituneen puristuspinnoiltaan. Yläpaarre leikkautui loveuksen syvyydeltä osittain vuosirenkaan suunnassa, ja liitosta koossapitänyt pultti katkesi murron yhteydessä. Nurkassa 3 liitoksen puristuspinnoit olivat hieman plastisoituneet, ja syntynyt liukuma oli noin 17 mm.

Rakenteen 6 kuormitusnopeus oli noin 9,2 kN/min. Voima nostettiin aluksi arvoon 19,5 kN, jonka jälkeen se poistettiin. Syntyneet alkusiirtymät olivat samaa suuruusluokkaa kuin vinokulmaisten loviliitosten koetuksessa. Tämän jälkeen kuormaa nostettiin vakionopeudella. Sallittu vaakasiirtymä $dx = 5$ mm saavutettiin molemmissa nurkissa kuorman ollessa noin Q_{max} :n suuruinen. Kuorma pidettiin 5 minuuttia arvossa 34 kN, jonka jälkeen voima poistettiin vielä kerran. Viimeisessä vaiheessa kuormaa nostettiin murtoon



Kuva 7.18. Voima-siirtymäkuvaajat rakenteen 5 koetuksesta.

Figure 7.18. The load-deformation curve, structure 5. The shape of the curve is caused by malfunction of loading equipment



7.19. Rakenteen 5 nurkka 1 leikkautumisen jälkeen.

Figure 7.19. The corner of the structure 5 after the rupture.

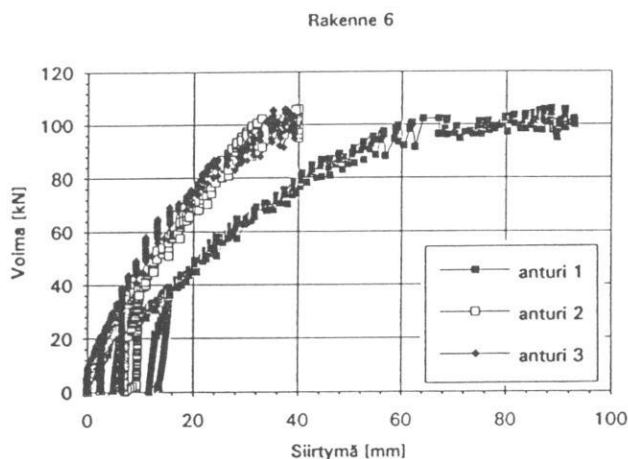
asti vakionopeudella. Kuvan 7.20 voima-siirtymäkuvaajissa näkyvä portaittaisuus johtui kappaleiden liukumisesta toistensa suhteen, jolloin liike oli kitkan takia nykäyksittäistä.

Molempiin nurkkiin syntyi aikaisessa vaiheessa halkeama, joka aiheutui poikittaisen vetolujuuden ylitymisestä yläpaarteiden räystäsosissa. Rakenne 6 poikkesi todellisista rakenteista paitsi räystäsosansa lyhyiden, myös liian lyhyen alapaarteiden takia. Tällöin alapaarre aiheutti yläpaarteeseen poikittaisen vetojännityksen liukuessaan yläpaarteeseen tehdyssä loveuksessa. Rakenne murtui nurkan 3 räystäsosan haljetessa kuorman arvolla 106,0 kN. Kuvassa 7.21 on nurkka 3 murron jälkeen. Ennen kuin kuorma ehdittiin poistaa rakenteen päältä, aiheutti nurkan 3 murtuessa syntynyt kulmanmuutos myös nurkan 1 halkeamisen. Liitoksissa syntyneet siirtymät olivat murtotilanteessa suuret, ja murtokuorma oli suurempi kuin rakenteelta vaadittu kuormakestävyys.

Nurkkien lähemmän tarkastelun jälkeen voitiin todeta sekä ylä- että alapaarteiden plastisoituneen puristuspinnoilta. Yläpaarteissa keskellä lappeita olleet kuivumishalkeamat olivat painuneet kiinni liitoksen läheltä noin 150 mm:n pituudelta. Lisäksi nurkkaan 1, alapaarteiden leikkauspinnalle oli syntynyt halkeama. Alapaarteiden liukuma oli nurkassa 1 noin 40 mm ja nurkassa 3 noin 39 mm.

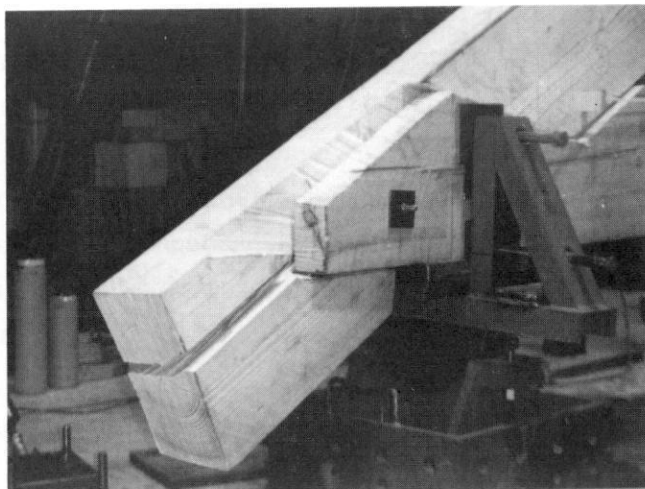
7.2.3 Tulosten analysointi

Molemmassa koestetuissa rakenteissa murtokuorma F_{murto} oli suurempi kuin rakenteelta vaadittu kuormakestävyys Q_{max} jolloin liitoksilla oli ylimääräistä kapasiteettia. Liitoksissa murtokuormalla syntyneet siirtymät olivat suuria (17...40 mm). Vertailukuorman Q_{max} arvolla siirtymät olivat samaa suuruusluokkaa kuin vinokulmaisten loviliitosten koestuk-



Kuva 7.20. Voima-siirtymäkuvaajat rakenteen 6 koestuksesta.

Figure 7.20. The load-deformation curve, structure 5. The shape of the curve is caused by friction.



Kuva 7.21. Rakenteen 6 nurkka 3 murtumisen jälkeen.

Figure 7.21. The corner of the structure 6 after the rupture.

nessa saadut siirtymät ja mitoitussiirtymä $\delta x = 5$ mm. Kokeissa saadut kuormien arvot on esitetty taulukossa 7.6. Erilaisia murtotapoja havaittiin kaksi: leikkausmurto ja poikittaisen vetolujuuden ylittyminen yläpaarteissa.

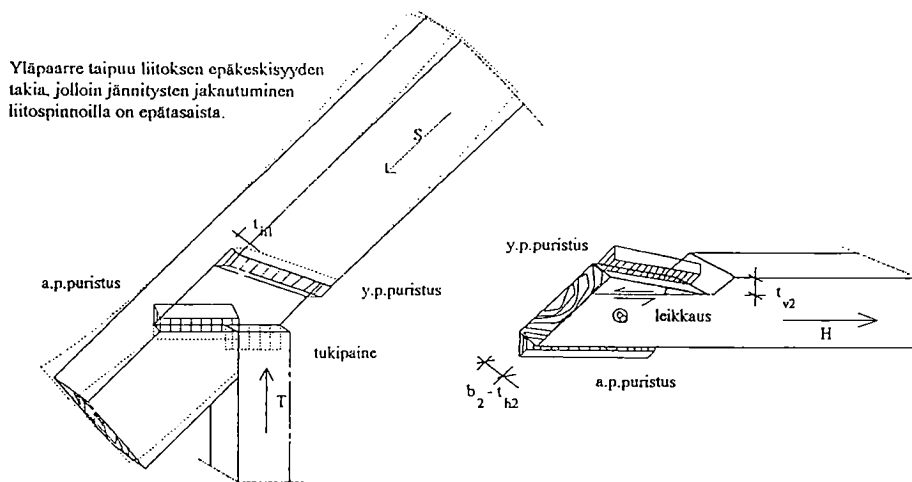
Taulukko 7.6. Rakenteiden vertailukuormat (ja vastaavat siirtymät), murtokuormat ja sauvavoimien maksimi-arvot, kappaleiden tiheydet 15 % kosteudessa ja tiheyden mukaan redusoidut murtokuormat sekä murtotavat.

Table 7.6. The comparison loads Q_{max} and equivalent deformation, MOR, S_{max} , density and MOR with moisture and density correction.

Rakenne Structure	Siirtymä Deformation [kN] [mm]		F_{murto} MOR [kN]	S_{max} [kN]	Tiheys Density [kg/m ³]	F_{red} MOR,red [kN]	Murtotapa
5	30,0	4,9	112,0	88,9	431	103,9	Nurkan 1 liitos murtui yläpaarteiden räystäösosan leikkautuessa loveus-syvyydeltä
6	25,2	4,8	106,0	118,0	431	98,4	Nurkan 3 liitos murtui poikittaisen vetolujuuden ylittyessä yläpaarteiden räystäösosassa.

Rakenne 5 murtui yläpaarteiden räystäösosan leikkautuessa alapaarteiden alta nurkassa 1. Huolimatta alapaarteiden alapuolisesta suuresta jännityksestä, ei pinta ollut plastisoitunut. Sen sijaan alapaarteiden yläpuolisen puristuspuolelta kärki oli plastisoitunut sekä ala- että yläpaarteiden puolelta. Tämä johtui rakenteen kulmanmuutoksen aiheuttamasta jännityshuipusta loveuksen kärjessä. Yläpaarteiden räystäösosan leikkautumisen aiheutti jännitysten epätasainen jakautuminen liitoksessa kuvan 7.22 mukaisesti. Tällöin jännitykset olivat suurimmillaan yläpaarteissa loveisyvyydellä, ja alapaarteet toimivat kiilan tavoin pyrkien leikkaamaan räystäösosaa pois.

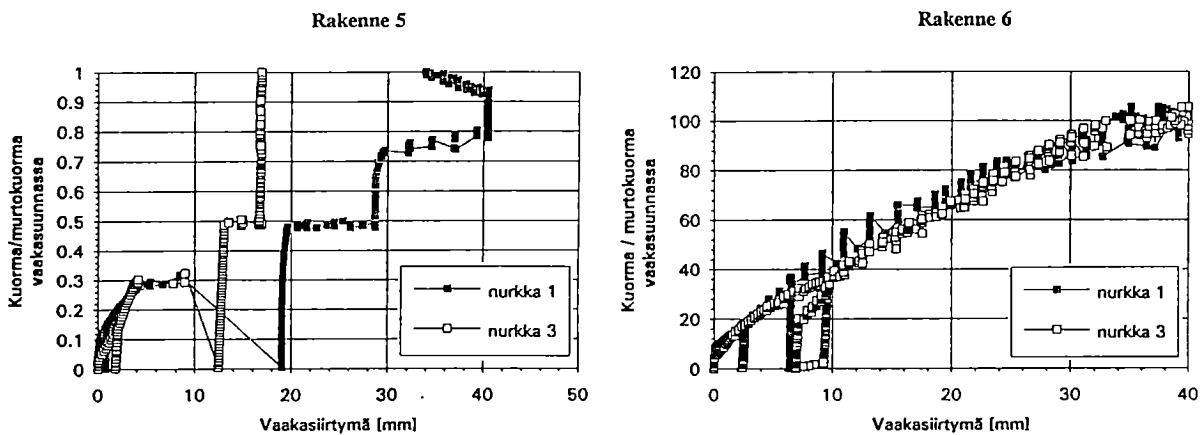
Rakenteen 5 nurkka 3 ei murtunut kuormituksessa. Nurkassa 3 syntyneet siirtymät olivat noin puolet nurkan 1 siirtymistä. Nurkan 3 tuki oli laakeroitu.



Kuva 7.22. Jännitysten jakautuminen lohenpyrstöliitoksessa.
Figure 7.22. Distribution of the stress in tension notch joint.

Rakenne 6 murtui yläpaarteen räystäösosan poikittaisen vetolujuuden ylittyessä nurkassa 3. Poikittaisen vetojännityksen aiheutti liian lyhyt alapaarre. Rakenteen 6 nurkka 1 murtui myös yläpaarteen räystäösosan poikittaisen vetolujuuden ylittyessä. Epätasaisesta jännitysten jakautumisesta johtuen jännitykset olivat todellisuudessa suuremmat, jolloin alapaarteen leikkauspinnalle loveuksen kärkeen syntyi halkeama. Nurkkien 1 ja 3 siirtymät olivat lähes yhtä suuret. Nurkan 1 tuki oli laakeroitu.

Molemmissa koestetuissa rakenteissa laakeroimattomasti tuettu nurkka murtui ensin, ja liitoksissa tapahtuneet siirtymät olivat kiilauksista huolimatta suuria. Vertailukuorman arvoon asti liitokset olivat yhtä jäykkiä kuin vinokulmainen loviliitos, mutta tämän jälkeen siirtymät kasvoivat nopeasti. Kun kuvassa 7.23 esitettyä lohenpyrstöliitoksen jäykkyyttä verrataan mekaanisin liittimin tehtyihin liitoksiin, jotka on esitetty kuvassa 7.14, voidaan todeta lohenpyrstöliitoksen olevan jäykkyydeltään huonompi kuin mikään mekaanisin liittimin tehdyistä liitoksista. Kun otetaan huomioon, että liitoksissa sallitut siirtymät ovat yleensä enintään 5 mm, jolloin voidaan katsoa liitoksen murtuneen, paranee lohenpyrstöliitoksien jäykkyys huomattavasti. Rakenteisiin käytetyn puun alkukosteudesta ja kuivumisen aiheuttamasta kutistumisesta johtuen ei nyt voitu koestaa yhtään kiilaamatonta liitosta, jolloin olisi voitu verrata kiilaamatoman ja kiilatun liitoksen jäykkyyksiä. Suurista siirtymistä riippumatta lohenpyrstöliitos on käyttökelpoinen liitos mitoituskuormilla.



Kuva 7.23. Rakenteiden 1 ja 3 lohenpyrstöliitosten jäykkyydet. Kuorman arvona on käytetty liitokseen vaikuttavan voiman vaakakomponenttia ja siirtymänä liitoksessa tapahtunutta vaakasiirtymää.

Figure 7.23. The stiffness of tension notch connections, trusses 1 and 3. The force and deformation are measured in horizontal direction.

7.2.4 Johtopäätökset

Lohenpyrstöliitoksen valmistus moottorisahalla oli melko helppoa ja tarkkaa. Liitoksien valmistustarkkuutta helpotti kappaleiden syvyyssuuntaisten loveuksien teossa moottorisahassa käytetyt rajoittimet. Työ oli aluksi hidasta, mutta nopeutui kokemuksen kasvaessa. Yhden kolmioristikon valmistukseen kului 175...225 minuuttia aikaa. Työtä voidaan

nopeuttaa käyttämällä moottorisahassa pitkää terää, jolloin viillot saadaan tehtyä ker-
tasahauksilla. Mittauksia voidaan helpottaa käyttämällä valmiita sabluunoja, joiden avulla
loveukset voidaan merkitä tarkemmin paikoilleen. Yläpaarteisiin tulee lohenpyrstön mitat
merkitä valmiin alapaarten mukaan, jolloin kappaleet sopivat paremmin yhteen. Lohen-
pyrstöliitoksia käytettäessä tulee puutavaran olla mahdollisimman lähellä lopullisen ympä-
ristön tasapainokosteutta, sillä puun kuivuminen ja kutistuminen vaikuttaa merkittävästi
liitoksen tiukkuuteen. Moottorisahaa käyttämällä voidaan liitos valmistaa riittävällä tark-
kuudella.

Rakenteisiin käytetyn ulkokuivan puutavaran kuivumisen takia kaikki liitokset jouduttiin
kiilaamaan. Liitosten kiilaamisesta huolimatta olivat niissä murtokuormalla syntyneet
siirtymät suuria (17...40 mm). Kokeissa saadut murtokuormat F_{murto} olivat kuitenkin
3,5...4,0 kertaa suurempia kuin rakenteilta vaaditut kuormakestävyudet Q_{max} . Vertailukuor-
man arvoilla liitoksen siirtymät olivat lähes mitoitussiirtymän $dx = 5$ mm suuruisia, jolloin
mitoitusohjeen voitiin todeta pitävän paikkansa.

Liitoksilla havaittiin kaksi erilaista murtomekanismia, jotka eivät ole suoraan yleistettä-
vissä, sillä koekappaleet poikkesivat todellisista rakenteista liian lyhyen räystäösosan
takia. Toinen rakenne murtui yläpaarten räystäösosan leikkautuessa alapaarten alta ja
toinen poikittaisen vetolujuuden ylittyessä yläpaarten räystäösosassa. Jälkimmäisen murron
aiheutti liian lyhyt alapaarre. Molemmista murtotavoista johtuen rakenteet menettivät
täysin kantokykynsä. Koottaessa kattotuoli lohenpyrstöliitoksien avulla tulee räystääs näin
ollen tehdä pitkäksi. Lisäksi alapaarten lohenpyrstön on oltava yläpaarten loveuksen
mittainen. Kaikki liitokset olivat ennen murtoaan hyvin sitkeitä.

8 YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

Järeällä sahatavaralla tarkoitetaan normaalia suurempaa sahatavaraa, jonka leveys on yli
75 mm ja korkeus 225...350 mm. Järeän sahatavaran pituus voi olla jopa 10 m. Kappaleet
voidaan sahata pituussuunnassa kiilamaisiksi, jolloin sahatavaran syyrakenne on ehjempi
kuin normaalilla sahatavaralla. Järeän sahatavaran lujuus on hyvä, mihin vaikuttavat oksien
suhteellinen vähyys ja edullisempi sijainti poikkileikkauksessa rasiustilaan nähden nor-
maaliin sahatavaraan verrattuna. Tutkimuksessa testatut järeät palkit kuuluivat lujuusluok-
kaan T30 /3/.

Muuttuvissa kosteusolosuhteissa järeän sahatavaran kosteusvaihtelut tapahtuvat vain
ohuessa pintakerroksessa. Lämmitetyissä, kuivissa tiloissa järeän sahatavaran halkeilu ja
vääntyminen aiheuttavat ongelmia, joita voidaan vähentää käyttämällä mahdollisimman
lähellä lopullista tasapainokosteutta olevaa puuta.

Järeällä sahatavaralla voidaan useissa tapauksissa korvata rakennuksen rungon osina
käytetyt teollisesti valmistetut kannatteet. Järeä puu soveltuu myös siltarakenteisiin ja
yhdyiskuntarakentamiseen.

Järeän sahatavaran rakennejärjestelmiä ovat pilari-palkki-rakenteet, kehät ja kantavat seinät -järjestelmä. Pilari-palkki-järjestelmässä järeästä sahatavarasta tehtyjen palkkien maksimijännemitta on noin 6 m. Yksiaukkoisen palkin taipuma kasvaa usein suureksi, jolloin edullisempi rakenne saadaan käyttämällä jatkuvia tai ulokkeellisia palkkeja. Myös vitaposkilla voidaan lyhentää palkin jännemittaa. Pilari-palkki-järjestelmä sopii halleihin, varastoihin, maatalouden ja teollisuuden tuotantotiloihin sekä asuinrakennuksiin. Pilari-palkki-rakenteiden kantavan rungon puumenekki on $0,03...0,04 \text{ m}^3/\text{rak-m}^2$.

Järeästä sahatavarasta tehtyjen kehien jännemitta on enintään noin 12 m. Kytkeytyissä kehissä kehäpalkit ja -pilarit liittyvät esimerkiksi naulauslevy- tai pulttiliitoksien toisiinsa, jolloin halkeilevaan päätypuuhun kohdistuu suuret rasitukset. Puun päätyhalkeilun ja voimien jakautumisen kannalta edullisempi rakenne on yhdistetty kehä, jossa kehäpalkki tuetaan pilarin lisäksi vinotuella. Tällöin myös liitokset tehdään nivelellisinä. Käyttämällä kiilamaista järeää sahatavaraa voidaan kehien puumenekki optimoida. Tällöin kytketyn kehän puumenekki on $0,03...0,05 \text{ m}^3/\text{rak-m}^2$ ja yhdistetyn kehän vain noin $0,025 \text{ m}^3/\text{rak-m}^2$. Kehiä käytetään halleissa, varastoissa sekä maatalouden ja teollisuuden tuotantotiloissa.

Kantavat seinät -järjestelmässä järeää sahatavaraa käytetään pääasiassa kantavissa vaakarakenteissa. Katon kantava rakenne voidaan tehdä pilari-palkki-rakenteena tai kolmioristikkona, jolloin saadaan täysin vapaa ullakkotila. Järeää sahatavaraa käytettäessä asuinrakennusten lattioiden taipumarajoitukset rajaavat välipohjan jännevälin n. 4,8 metriin. Parruista voidaan koota myös massiivinen puulaatta. Tällöin lattian ylä- ja alapinta saadaan kerralla valmiiksi, mutta puumenekki on suuri ($0,15 \text{ m}^3/\text{rak-m}^2$). Lisäksi massiivisessa laatussa puun kosteusmuodonmuutokset ovat ongelma, jota voidaan vähentää käyttämällä enintään 12 %:n kosteudessa olevaa puuta. Laattaan puun kuivuessa syntyvät raot voidaan minimoida tekemällä laatta toisiinsa kyljellään naulatuista lankuista. Järeät välipohjapalkit voivat olla näkyviä tai lattiarakenteen sisään jääviä. Käytettäessä järeää puuta vaakarakenteissa voidaan rakennus tehdä "platform"-rakenteisena, jolloin rakennus rakennetaan taso kerrallaan. Seinät rakennetaan vaakarakenteiden päälle, jolloin järeiden vaakarakenteiden korkeussuuntaiset kosteusmuodonmuutokset voivat tapahtua ongelmitta. Pientalon kantavien rakenteiden puumenekki on noin $0,09...0,17 \text{ m}^3/\text{rak-m}^2$, kun rakennuksen ulkoseinät ovat kantavia seiniä, rakennuksen keskellä on järeästä sahatavarasta tehty pilari-palkki-linja sekä väli- ja yläpohjat ovat järeää sahatavaraa. Kantavat seinät -järjestelmää käytetään asuin- ja tuotantorakennuksissa.

Koska järeän sahatavaran kosteus asennettaessa on yleensä $18 \% \pm 2 \%$, on järeän sahatavaran liitokset suunniteltava siten, että ne eivät estä järeän puun kosteusmuodonmuutoksia. Järeän puun liitoksissa käytettäviä mekaanisia liittimiä ovat naulat, naula- ja naulauslevyt, vaarnat, pultit sekä metalliset liitoselimet. Naulaliitoksissa käytetään noin 4...6 mm paksuja nauvoja. Naulalevyjä voidaan käyttää liitosalueen ja järeän halkeilleen puun vahvistamiseen. Naulalevyä vastaavaa piikkilevyä käytetään suuria voimia siirtävissä liitoksissa, kuten kehänurkissa. Naulauslevy voi olla vaneria, peltiä tai ohutta terästä.

Vanerilevyt naulataan puun pintaan, ja ohuet teräslevyt sekä pelti sijoitetaan puun sisään tehtyihin uriin, jolloin liitos voidaan tehdä monileikkeiseksi. Naulauslevyjä käytetään pilari-palkki-rakenteiden ja kehien nurkkaliitoksissa sekä palkien ja pilareiden jatkoksissa. Mikäli käytettävien naulojen paksuus on yli 5 mm, tulee naulojen reiät esiporata. Tällöin liitoksen siirtymät ja puun halkeilu vähenevät.

Pulttien kanssa voidaan järeän puun liitoksissa käyttää teräslevyjä tai erityisiä metallisia liitoselimiä, jotka pienentävät liitoksen siirtymiä ja kasvattavat liitoksen kantokykyä. Pultteja käytettäessä on rakenteellisesti varattava mahdollisuus liitoksen myöhempään kiristämiseen. Vaarnat sopivat hyvin järeän sahatavaran liittämiseen, sillä vaarnaliitoksien alkusiirtymät ovat pienemmät kuin pulttiliitoksien. Tappivaarnaliitos on usein taloudellisempi liitos kuin pulttiliitos. Tapit lyödään 0,2...0,5 mm halkaisijaansa pienempään reikään, ja liitos varmistetaan sidepultilla. Tappivaarnojen yhteydessä voidaan myös käyttää teräslevyjä. Järeän puun liitoksissa käytettäviä erikoisvaarnoja ovat rengas-, hammas-, lautas- ja suorakaidevaarnat. Erikoisvaarnaliitos varmistetaan sidepultteilla, jotka vaikuttavat samalla liitoksen kantokykyyn ja ehkäisevät järeän puun kutistumisen ja vääntymisen aiheuttaman liitoksen aukeamisen sekä kantavat vaarnaan syntyvästä momentista aiheutuvan saumapintaa vastaan vaikuttavan voimakomponentin. Edullisin erikoisvaarna on muototeräksestä leikattu T-muotoinen suorakaidevaarna. Pultteja ja vaarnoja voidaan käyttää palkkien jatkoksissa, pilari-palkki- ja kehänurkissa sekä liitettäessä sekundääripalkkeja primääreihin ja arinapalkkeja toisiinsa.

Kontaktiliitoksilla järeää puuta voidaan liittää edullisesti verrattuna metallisilla liittimillä tehtyihin liitoksiin. Liittimillä varmistetaan liitettävien osien paikoillaan pysyminen, mutta voima siirtyy kappaleelta toiselle suoralla puristuksella. Liitosten valmistus on nykyaikaisia laitteita käyttäen helppoa ja nopeaa. Yhden liitoksen tekoon moottorisahalla kului koeristikoilla noin 35 minuuttia aikaa. Vinokulmainen loviliitos voi siirtää suuriakin voimia. Liitoksen lujuuteen vaikuttaa liitettävien kappaleiden välinen kulma, lovisyvyys ja lyhyen lovipinnan kaltevuus, leikkauspituus, liitettävien kappaleiden kutistuminen sekä kolmioristikoissa yläpaarteiden taipuma. Loviliitosta voidaan käyttää kattotuoleissa ja vitaposkirakenteissa. Kolmioristikoille tehdyissä kokeissa vinokulmaiselle loviliitokselle havaittiin kolme erilaista murtumismekanismia: lyhyen lovipinnan plastisoituminen, leikkautuminen leikkauspintaa pitkin ja murtuminen leikkauspinnalta vuosirenkään suunnassa, jonka mahdollisti lyhyen lovipinnan ylisahaus. Jälkimmäinen murto tapahtui leikkausvoiman ja poikittaisen vedon yhteisvaikutuksesta. Kokeissa saadut murtokuormat olivat valmistuksen epätarkkuuksista huolimatta 1,3...1,7 -kertaisia vertailukuormiin nähden. Vinokulmaisen loviliitoksen siirtymät murtokuormalla olivat pieniä (vaakasunnassa 3,5...10,7 mm ja pystysunnassa 1...4 mm), jolloin liitos jäykkyydeltään vastasi vaarnaliitosta.

Lohenpyrstöliitos on perinteinen kattotuoleissa käytetty liitos, jonka lujuus on pienempi kuin vinokulmaisen loviliitoksen. Lohenpyrstöliitoksen lujuuteen vaikuttaa liitettävien kappaleiden välinen kulma, alapaarteen ala- ja yläpuolisen puristuspuunnan suuruus, lohenpyrstön kaltevuus, käytettävät liittimet ja puun kosteusmuodonmuutokset. Lohenpyrstölii-

tos voidaan helposti valmistaa rajoittimin varustetulla moottorisahalla. Kolmioristikoille tehdyissä kokeissa lohenpyrstöliitokselle havaittiin kaksi erilaista murtumismekanismia: yläpaarten leikkautuminen alapaarten alta ja yläpaarten poikittaisen vetolujuuden ylittyminen. Koestetuissa rakenteissa "räystä" oli lyhyt, minkä takia todettuja murtomekanismeja ei voida yleistää. Koetulosten perusteella voitiin havaita lohenpyrstöliitoksen alapuolisen yläpaarten osan tärkeys lohenpyrstöliitoksin kootuissa kolmioristikoissa. Lohenpyrstöliitos oli sitkeä liitos, joka kesti noin 3,5...4 -kertaisesti vertailukuorman, vaikkakin siirtymät tällöin kasvoivat suuriksi (17...40 mm). Lohenpyrstöliitosta ja sen pitkäaikaislujuutta tulisi tutkia tarkemmin koekappaleilla, joissa lohenpyrstöliitoksen alapuolisen osan pituus yläpaarteessa vastaa pituudeltaan normaalia kattotuolia.

Tutkimuksessa on keskitytty järeän sahatavaran käyttöön rakennuksissa, mutta myös muussa rakentamisessa järeä sahatavara on taloudellinen vaihtoehto, jonka käyttömahdollisuuksia tulisi tutkia tarkemmin. Kiilamaisen järeän sahatavaran käytöllä saavutettavia etuja tulisi tutkia.

Tämän tutkimuksen pohjalta järeän sahatavaran käyttöön liittyvää jatkotutkimusta vaatisivat mm. seuraavat asiat:

1. Järeän sahatavaran lujuuslajittelu sekä halkeilun ja kosteusvaihteluiden vaikutus järeän sahatavaran pitkäaikaislujuuteen
2. Järeän sahatavaran kuivaustekniikka. Järeä sahatavara tulisi voida kuivata halkeilematta noin 15 % ± 3 % kosteuteen, jotta puun kuivuminen lämmitettävissä tiloissa ei aiheuttaisi halkeilua.
3. Järeän sahatavaran liitostekniikat ja liitosten valmistustekniikat
4. Järeän sahatavaran muut käyttökohteet rakentamisessa sekä esimerkiksi huonekaluteollisuudessa tai soitinten valmistuksessa.

KIRJALLISUUSLUETTELO

/1/ UTUNEN, M. Erikoisharjoittelu, Saatavissa oleva järeä puutavara ja tukkien virhetarkastelu. Helsingin Yliopisto 1994. (Julkaisematon).

/2/ PURSIAINEN, KORTESMAA, LEPPÄVUORI, SAARELAINEN. Puun käyttö kantavissa rakenteissa. VTT 1983.

/3/ PIHLAJAMAA, T. Järeän sahatavaran mekaaniset ominaisuudet. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu 1994.

/4/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. Puurakentaminen, Tekniikka ja arkkitehtuuri, Osat II RIL K161-1993, III RIL K162-1993 ja IV RIL K163-1993. Helsinki 1993.

/5/ PIHLAJAMAA, T. Järeän sahatavaran hidas kuivaus. Erikoistyö. Teknillinen Korkeakoulu 1994. (Julkaisematon).

/6/ K.-H. GOEZE, D. HOOR, K. MOEHLER, J. NATTERER: Timber Design & Construction sourcebook. McGraw-Hill Inc. New York 1989.

/7/ ROBERT VON HALÁSZ, CLAUS SCHEER. Holzbau - Taschenbuch, Band 1: Grundlagen, Entwurf und Konstruktionen. Ernst & Sohn. Berlin 1986.

/8/ AHOLA, P. Liimapuuliitosten arviointi- ja suunnitteluperusteet. Diplomityö, Teknillinen Korkeakoulu 1987.

/9/ KANGAS, J. Puurakenteet 3, Liitokset. Helsinki 1982.

/10/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. RIL 162-1, 2 Puurakenteet I, II. Helsinki 1987.

/11/ DRÖGE, STÖY. Grundzüge des neuzeitlichen Holzbaues, Band 1, Konstruktionselemente. Ernst & Sohn. Berlin 1981.

/12/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. Puurakenteiden suunnitteluohjeet, RIL120 - 1983. Helsinki 1983.

/13/ Entwicklungsgemeinschaft Holzbau: Informationsdienst Holz, Holzbau Handbuch - Reihe 2: Tragwerksplanung, Teil 2 Verbindungsmittel, Folge 2 Genauere Nachweise Sonderbauarten.

- /14/ STALNAKER, J. J. & HARRIS, E. C. Structural design of wood, Structural engineering series. VNR. New York 1989.
- /15/ OZELTON, B. Timber designers' manual. Crosby Lockwood Staples. Lontoo 1976.
- /16/ SAARELAINEN, U. Puurakenteet 1, Puu materiaalina. Rakentajain Kustannus. Helsinki 1981.
- /17/ SIEKKINEN, A. Diplomityö, Puupilarien epälineaarinen toiminta. TKK 1982 .
- /18/ Maatalousseurojen keskusliitto, Asutusvaliokunta. Maatalouden rakennusopas, Työselitys. Helsinki 1947.
- /19/ Bauen mit Holz 6/91.
- /20/ KIVIOJA, A. Diplomityö, Pyöreän puun käyttömahdollisuudet ja puun säilyvyys maatalouden tuotanto- ja varastorakennuksissa. TTK 1991.
- /21/ Käsityönkirja. Puurakennustaito. Helsinki 1946.
- /22/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. Rakenteiden kuormitusohjeet, RIL 144-1990. Helsinki 1990.
- /23/ KÄHKÖNEN, L. Kantavat puurakenteet, insinööriopetus. Rakentajain Kustannus. Helsinki 1982.
- /24/ Basic Carpentry illustrated. Lane publishing Co Sunset. California 1989.
- /25/ Bauen mit Holz 1/94.
- /26/ RUSKE, W. Planen und Bauen mit Holz, HolzHäuser in Detail.
- /27/ Suomen Rakentamismääräyskokoelma, Osat B1, B2, B10, E1, E2, E5. Valtion painatuskeskus. Helsinki.

VAKOLAn tutkimuseloituksia

49. Maatalouskoneiden tietokanta. 1988.
50. Lannanpoistolaitteiden toiminta ja kestävyys. 1988.
51. Pienten pihatoiden ilmanvaihdon erityisvaatimukset. 1988.
52. Tuotantorakennusten suunnittelu ja rakentaminen käytännössä. 1988.
53. Hellävarainen perunankorjuu. 1989.
54. Syyskylvöä korvaavien muokkausmenetelmien vaikutus kevätvehnän satoon 1975-1988. Pitkäaikaisen aurattoman viljelyn vaikutukset hiesusaven rakenteeseen ja viljavuuteen 1989.
55. Ei julkaisua.
56. Kosteiden pintojen kosteudentuotanto navetoissa. 1989.
57. Kylmäilmakuivurin mitoitus ja käyttö. 1990.
58. Leikkuupuimurin kulkukyky vaikeissa olosuhteissa. 1990.
59. Lietelantajärjestelmien toimivuus. 1990.
60. Heinän varastokuivaus. 1991.
61. Viljankuivauksen pölyhaitat. 1992.
62. Säilörehun siirto ja käsittely talvella. 1991.
63. Naudanlihan tuotantomenetelmät ja -rakennukset. 1992.
64. Kiedotun pyöröpaalisäilörehun valmistustekniikka ja laatu. 1993.
65. Hellävarainen perunan kauppakunnostus. 1993.
66. Naudanlihan tuotantomenetelmät ja -rakennukset II. 1993.
67. Betonit ja muovit navetan lattiamateriaaleina. 1993.
68. Lannankäsittelyn taloudellisuuden ja lannan ravinteiden hyväksikäytön parantaminen. 1994.
69. The effect of ground profile and plough gauge wheel on ploughing work with a mounted plough. 1994.
70. Järeän sahatavaran mekaaniset ominaisuudet. 1995.
71. Järeän sahatavaran käyttö rakennuksissa, rakennejärjestelmät ja liitokset. 1997.
72. Lannan levitys kasvustoon. 1996. Osa 1. Lietelannan sijoituslaitteen rakenteelliset vaatimukset suomalaisissa olosuhteissa.
73. Lannan levitys kasvustoon. 1996. Osa 2. Lietelannan levitysmahdollisuudet kasvavaan viljanoraaseen.
74. Kylmäkasvattamoiden kuivikepohjien toimivat vaihtoehdot. 1996.
75. Koneiden turvallisuuden ja tehokkuuden parantaminen. 1996.
76. Laboratorioiden työn ja työympäristön kehittäminen. 1996.
77. Pienmoottoreiden päästöt. 1997. (Mobile 210T).

VAKOLAn rakennusratkaisuja

- 1/1994 Kylmä osakuivikepohjainen emolehmäkasvattamo.
- 2/1995 Rehtijärven keinokosteikko.
- 3/1995 Puurakenteiset ruokinta-aidat ja parrenerottimet.
- 4/1996 Perustamistapojen hintavertailu.
- 5/1997 Havaintoja kylmäpihattojen lannankäsittelystä.
- 6/1997 Kalustohallista toimiva sikala

VAKOLAn tiedotteita

- 49/91 Betonit ja muovit navetan lattiamateriaaleina
- 50/91 Pölyn ja roskien talteenotto lämminilmakuivamossa
- 51/92 Viherkesannon perustaminen ja hoito
- 52/92 Kaasut ja pöly eläinsuojien ilmanvaihdossa
- 53/93 Lannoitteenlevittimien levitystasaisuus
- 54/93 Maaseudun koerakentamisen ohjelmointi
- 55/93 Pyöröpaalisäilörehun korjuu, varastointi ja laatu
- 56/93 Maaseuturakentamisen ideakilpailu
- 57/93 Syyskylvöjen varmentaminen
- 58/93 Maatilan ja maatilamatkailun jätehuolto
- 59/93 Maatilamyymälätoiminta vanhassa maatilan asuinrakennuksessa
- 60/93 Tyhjien maatilarakennusten uusi käyttö
- 61/94 Lietelannan varastointi ja levitys
- 62/94 Tuotantorakennusten alapohjia ja piha-alueiden päällysrakenteita
- 63/94 Turvallinen puunpilkonta
- 64/94 Itkupinta-tuloilmalaitteen vaikutus eläinsuojassa
- 65/94 Oksainen hake pienpolttimissa
- 66/94 Pako- ja savukaasujen analysointi
- 67/94 Käyttökokemuksia jyrskylvölannoittimista
- 67S/94 Brukserefarenheter av vältkombisåmaskiner
- 68/94 Käsikäyttöisten liekittimien käyttöominaisuuksia
- 69/95 Renkaiden vaikutus traktorin vetokykyyn ja maan tiivistymiseen
- 70/95 Hakkeen kuivaus imuilmalla
- 71/95 Klapiattiloitten käyttöominaisuudet
- 72/96 EPS-rakeet ja EPS-rouhe sikalan lietesäiliön katteena
- 73/96 Kevytsaviharkkojen kuivuminen ja lujuus
- 74/97 Rikkakasvien torjunta viljoista rivivälisarauksella
- 75/97 Öljypellavan leikkuupuinti
- 76/97 Tilasäiliöopas

