

TUULA PIHLAJAMAA JORMA JANTUNEN

JÄREÄN SAHATAVARAN MEKAANISET OMINAISUUDET

STRUCTURAL PROPERTIES OF LARGE-SIZED TIMBER



VAKOLAN TUTKIMUSSELOSTUS 70

MAATALOUDEN TUTKIMUSKESKUS

VIHTI 1995

MAATALOUDEN TUTKIMUSKESKUS
Agricultural Research Centre of Finland

VAKOLA

Maatalousteknologian tutkimuslaitos

Osoite
Vakolantie 55
03400 VIHTI

Puhelin
(90) 224 6211
Telefax
(90) 224 6210

Institute of Agricultural Engineering

Address
Vakolantie 55
FIN-03400 VIHTI
FINLAND

Telephone int. +
358-0-224 6211
Telefax int. +
358-0-224 6210

TUULA PIHLAJAMAA JORMA JANTUNEN

**JÄREÄN SAHATAVARAN MEKAANISET
OMINAISUUDET**

STRUCTURAL PROPERTIES OF LARGE-SIZED TIMBER

VAKOLAN TUTKIMUSSELOSTUS 70

MAATALOUDEN TUTKIMUSKESKUS

VIHTI 1995

SISÄLLYSLUETTELO

KUVAILULEHDET

ALKULAUSE

KÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT	8
MERKINNÄT	10
1. JOHDANTO	12
2. JÄREÄN SAHATAVARAN RAAKA-AINE	13
3. PUUN KASVUBIOLOGIA	15
3.1 Kasvuolosuhteiden vaikutus puun tiheyteen	16
3.2 Puun taivutuslujuus- ja kimmo-ominaisuudet rungon eri osissa	19
3.3 Puun kasvujännitykset	21
3.4 Oksaisuuteen vaikuttavat tekijät	21
3.5 Yhteenveto kuusen ja männyn ominaisuuksista	25
4. PUUAINEN RAKENNE JA OMINAISUUDET	28
4.1 Puun rakenne	28
4.1.1 Sydän- ja pintapuu	29
4.1.2 Vuosilusto	29
4.1.3 Nuorpuu ja ydin	30
4.1.4 Reaktiopuu	30
4.2 Puun fysikaaliset ominaisuudet	31
4.2.1 Tiheys	31
4.2.2 Kosteus	31
4.2.3 Kosteusmuodonmuutokset	31
4.3 Puun paloturvallisuus	34
5. PUUN LUJUUS- JA KIMMO-OMINAISUUDET	34
5.1 Yleistä	34
5.2 Kosteuden vaikutus lujuuteen	35
5.3 Kuormitusajan vaikutus lujuuteen	35
5.3.1 Kuormitusaika	35
5.3.2 Viruminen	36
5.4 Viat ja niiden vaikutus puun lujuuteen	38
5.4.1 Vino- ja kierresyisyys	38
5.4.2 Oksat	38
5.4.3 Reaktiopuu	39
5.4.4 Halkeamat	39
5.4.5 Laho ja muut viat	40
5.5 Kuormitustavan ja jännevälän vaikutus puun lujuuteen	41
5.6 Poikkileikkauksen muodon vaikutus puun lujuuteen	44
5.6.1 Pyöreä puutavara	44

	5.6.2	Sahatavara	46
	5.6.3	Järeä sahatavara	47
6		KOKEET	50
	6.1	Koeohjelma	50
	6.1.1	Tavoite	50
	6.1.2	Tutkimusmenetelmät	50
	6.2	Järeiden lankkujen vikaisuustarkastelu	51
	6.2.1	Lujuusluokittelu	51
	6.2.2	Tulokset	52
	6.3	Järeän sahatavaran kuivumismuodonmuutokset	55
	6.4	Lujuuskokeet	58
	6.4.1	Koekappaleet	58
	6.4.2	Koejärjestelyt	58
	6.4.3	Kokeiden toteutus	61
	6.4.4	Tulosten käsittely	62
	6.4.5	Lujuuskokeiden tulokset	65
	6.4.6	Järeän sahatavaran lujuus	72
	6.4.7	Järeän sahatavaran murtomekanismit	73
7		PÄÄTELMÄT	77
	7.1	Suunnitteluarvot	77
	7.2	Järeän sahatavaran sahaussuositus	78
	7.3	Järeän sahatavaran kuivaus	81
	7.4	Järeän sahatavaran käyttömahdollisuudet ja kilpailukyky	81
	7.5	Jatkotutkimusehdotukset	83
8		YHTEENVETO	84
		KIRJALLISUUSLUETTELO	86

LIITTEET

L1	Koekappaleet	L1.1
L2	Tapulointi	L2.1
L4	Kosteusnäytteet	L4.1 - L4.4
L5	Puristuskokeiden kuvaajat	L5.1
L6	Mänty- ja kuusilankkujen oksasummat	L6.1 - L6.2
L7	Koveruuden laskeminen yksinkertaistetulla tavalla	L7.1
L8	Koveruusmittaustulokset ja laskenta-arvot	L8.1
L9	Palkkien voima-taipumakuvaajat	L9.1 - L9.5
L10	Plastisoitumispisteen laskenta	L10.1
L11	Poikkileikkauksen plastinen jännitys jakauma	L11.1 - L11.2
L12	Lujuuskokeiden tulokset	L12.1 - L12.2

Tekijät (toimielimestä: toimielimen nimi, puheenjohtaja, sihteeri)		Julkaisun laji Tutkimusselostus	
Tuula Pihlajamaa Jorma Jantunen		Toimeksiantaja	
		Toimielimen asettamispvrm	
Julkaisun nimi (myös ruotsinkielinen) Järeän sahatavaran mekaaniset ominaisuudet			
Julkaisun osat			
Tiivistelmä			
<p>Tutkimus käsittelee järeän sahatavaran mekaanisia ominaisuuksia. Tässä työssä järeällä sahatavaralla tarkoitetaan yli 75 mm leveää ja yli 225 mm korkeaa sahatavaraa. Kirjallisuusosassa selvitetään suomalaisen männyn (<i>Pinus sylvestris</i>) ja kuusen (<i>Picea abies</i>) puuaineen ominaisuuksia sahaamattomassa tukissa ja tarkastellaan niiden hyödyntämistä valmiissa sahatavarassa. Järeän sahatavaran mekaanisia ominaisuuksia tutkitaan täysimittakaavaisten kokeiden avulla.</p> <p>Järeässä sahatavarassa on mahdollista käyttää hyväksi puun luonnollisia ominaisuuksia. Puun rungon tiheyden kasvaminen ja vuosilustojen paksuuden pieneneminen siirryttäessä ytimeistä pintaan päin vaikuttavat siihen että esim. taivutuksessa eniten rasitetuilla alueilla eli palkin ylä- ja alapinnoissa on lujin puuaines. Järeässä lankussa sisällä olevien, kylestyneiden oksien kohdalla palkin särmät jäävät ehjiksi. Taivutuksessa oksien vaikutus ei tällöin ulotu ylä- ja alapinnan eniten rasitetuille vyöhykkeille, joten sisäoksien vaikutus lujuuteen on erittäin pieni. Puun mekaaniset ominaisuudet paranevat mitä kauemmas ytimeistä mennään. Jos aihio sahataan niin että ydin- ja nuorpuu jää pois, pienenee kuivauksen aiheuttamien halkeamien ja muodonmuutosten määrä verrattuna aihioihin, joissa ydin on jäänyt sisään.</p> <p>Järeälle sahatavaralle suoritetun vikaisuustarkastelun perusteella järeissä kuusilankuissa (15 kpl) oli lujuusluokan T40 pituus tyvestä latvaan päin mitattuna keskimäärin 259 cm ja lujuusluokan T30 410 cm. Yhtä lukuunottamatta kaikki kuusilankut täyttivät lujuusluokan T24 vaatimukset koko pituudeltaan (7,5 m). Järeistä mäntylankuista (11 kpl) saatiin kaikista vähintään 5 m luokkaan T40 luokiteltua sahatavaraa.</p> <p>Taivutuskokeissa kuormitettiin kahdeksan palkkia murtoon ja kaksi kimmoisesti kosteusluokassa 3 ja aikaluokassa C. Koetulosten perusteella järeiden lankkujen taivutuslujuuden ominaisarvoksi f_{tk} saatiin 26,9 MPa ja tiheys- ja kosteuskorjatuksi ominaisarvoksi 34,3 MPa. Kaikkien kuormitettujen palkkien perusteella laskettiin kimmomodulin E, ominaisarvoksi 9000 MPa. Koetulosten perusteella 100 mm ja sitä leveämmät järeät lankut, joiden korkeus on suurempi kuin 250 mm, täyttävät luokan T30 vaatimukset. Sekä nyt suoritettujen kokeiden tulokset että kirjallisuudesta löytyneet tiedot viittaavat siihen, että puupoikkileikkauksen taivutuskapasiteetin optimointi vain korkeutta kasvattamalla ei johda parhaaseen lopputulokseen. Leveyden kasvaessa puulle tyypillisten vikojen, kuten oksien, merkitys poikkileikkauksessa pienenee ja kappaleen lujuus kasvaa. Kokeiden perusteella järeälle sahatavaralle alle 6 m:n jänneväleillä ei tarvitse suorittaa kokoon tai pituuteen liittyvää lujuuden redusointia.</p> <p>Laboratoriokokeissa ei pystytty osoittamaan päätyhalkeilun vaikutusta leikkauslujuuteen. Brutto-poikkileikkauksen perusteella määritetyn leikkauslujuuden ominaisarvoksi f_{vk} saatiin 2,8 MPa. Leikkausmurtopinta ei noudattanut kuivumishalkeilua. Se poikkesi lähellä puun pintaa kuivumishalkeamasta ja eteni vuosilustoa myöten, väistäen kappaleen sisään jäänyttä ydintä. Ytimen läheisyydessä poikkileikkauksen tiheys kuitenkin oli pienimmillään, joten ympäristöä lujempi puuaines ei selittä ilmiötä.</p> <p>Järeän sahatavaran käyttäytyminen pitkäaikaiskuormituksessa vaatii lisätutkimusta. Erityisesti leikkausmurtoon ja -lujuuteen vaikuttavat tekijät vaativat lisäselvitystä.</p>			
Avainsanat (asiasanat) Järeä sahatavara, puu, lujuus, mekaaniset ominaisuudet			
Muut tiedot Saatavana Maatalouden tutkimuskeskuksen maatalousteknologian tutkimuslaitokselta (MTT VAKOLA) puhelin (90) 224 6211 telekopio (90) 224 6210			
Sarjan nimi ja numero		ISSN ISSN 0782-0054	ISBN
Kokonaissivumäärä	Kieli	Hinta	Luottamuksellisuus
Jakaja VAKOLA, Vakolantie 55, 03400 VIHTI		Kustantaja	

Authors (if organ: name of organ, chairman, secretary) Tuula Pihlajamaa Jorma Jantunen	Type of publication Study report
	Comissioned by
	Date of setting up organ
English and Swedish title of publication Structural properties of large-sized timber	
Parts of publication	
Abstract The study report discusses the structural properties of large-sized sawn timber of spruce (<i>Picea abies</i>) and pine (<i>Pinus sylvestris</i>). In this work, large-sized sawn timber refers to timber with a cross-section exceeding 100 mm width and 250 mm height. The report is based on literature, calculations and laboratory tests. In large-sized sawn timber it is possible to utilize the natural properties of wood. In over-aged trees the density of wood increases and the annual ring width decreases further away from the pith. Together these two things contribute to the fact that the strength of wood is highest near the surface. Large-sized timber is sawn out of the buttlog where the wood is at its densest and the knots are smallest. When the tree gets older the absolute length of the knotless zone of the tree increases. Large-sized timber can be sawn tapered in which case the grain structure of the timber remains more unbroken than that of normal sawn timber. The significance of knots inside the log decreases when the log is sawn into a few big pieces. The over-grown knots, which are inside the large-sized plank, do not have significant influence on the bending strength. In bending, stresses are at their highest at upper and lower parts of the cross section where the grains of the wood are unbroken. Timber with two sawn surfaces whose grains are untouched on opposite sides has the best bending strength. The grading of large-sized sawn timber was based on the knots. In a spruce beam the average length of grade T40, measured from the butt towards the top, was 259 cm and grade T30 410 cm. All pine beams had at least 5 m timber of grade T40. In full-sized bending tests eight beams were loaded to failure and two elastically. From the results of these tests was calculated the characteristic values of bending strength, modulus of elasticity and shear strength. The short term bending strength f_{tk} for wood, whose moisture content is 20 - 23%, is 26,9 MPa and the modulus of elasticity E_r is 9000 MPa. The density and moisture content adjustment to grade T30 and 15% increases bending strength up to 34,3 Mpa. The test results indicate that large-sized beams with more than 100 mm width and more than 250 mm height fulfill the requirements of grade T30. Both the literature and the test results indicate that bending strength does not automatically decrease when the volume of the beam increases. Height seems to have a negative influence on the bending strength whereas the width affects it in the opposite way. When the width increases the share of faults, like knots, in cross sections decrease and they have less effect on the strength. The optimization of bearing capacity of wooden beams by increasing height might not lead to the best results but together with increase of the width the target can be achieved. In laboratory tests the influence of end check to shear strength could not be determined. Characteristic value of the shear strength f_{vk} calculated for the whole cross section was 2,8 Mpa. The shear shake did not follow the end check but diverged from the check near the surface and continued along an annual ring. The shake did not go through the pith although the density of the wood was lowest there. The long-term structural behaviour and especially the shear properties need futher study.	
Key words Large-sized sawn timber, wood, strength, mechanical properties	
Additional information MTT VAKOLA Telephone +358-0-224 6211 Telefax +358-0-224 6210	
Name of series, number VAKOLAn tutkimusselostus	ISSN 0782-0054
Sold by VAKOLA, Vakolantie 55, FIN-03400 VIHTI, FINLAND	ISBN 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.

Tutkimus koostuu seuraavista osaprojekteista:

1. Järeän puutavaran korjuu, maat.metsät. yo. Paula Kallioniemi ja MML Jukka Pietilä.
2. Saatavissa oleva järeä puutavara ja tukkien virhetarkastelu, maat.metsät. yo Mikko Utunen, MML Jukka Pietilä ja DI Jorma Jantunen.
3. Järeän sahatavaran kuivaus, tekn.yo. Tuula Pihlajamaa ja DI Jorma Jantunen.
4. Järeän sahatavaran mekaaniset ominaisuudet, tekn.yo. Tuula Pihlajamaa ja DI Jorma Jantunen.
5. Järeän puun käyttö rakentamisessa, rakennejärjestelmät ja liitokset, tekn.yo. Tiina Vuorinen ja DI Jorma Jantunen.
6. Koerakentaminen, konehalli Nikula, DI Jorma Jantunen
7. Järeän sahatavaran talousselvitys, DI Jorma Jantunen

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 DI Jorma Jantunen.

Tässä osatutkimuksessa selvitetään järeän sahatavaran mekaanisia ominaisuuksia kuten lujuutta ja kimmo-ominaisuuksia sekä järeän sahatavaran kuivaukseen ja sahaukseen liittyviä erityiskysymyksiä.

Tuula Pihlajamaan diplomityönään tekemää osatutkimusta valvoi Teknillisessä korkeakoulussa Pekka Kanerva ja työtä on ohjannut Jorma Jantunen. Järeän sahatavaran mekaanisten ominaisuuksien selvittämiseksi tehdyt kokeet on tehty TKK:n talonrakennustekniikan laboratoriossa, osittain puurakenteiden yleisopintojakson laboriorioharjoitusten yhteydessä. Kokeissa käytetty puu on hankittu VAKOLAN metsästä. Sahatavaran vikaisuustarkastelu on tehty yhteistyössä mmyo. Mikko Utusen kanssa.

Haluamme esittää parhaat kiitokset valvojakunnalle, VAKOLAN henkilökunnalle sekä TKK:n rakennusosaston talonrakennustekniikan oppituolin ja koehallin henkilökunnalle.

Tuula Pihlajamaa

Jorma Jantunen

Otaniemessä 16.1.1995

KÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT

Alaharvennus

Metsästä poistetaan kuolevia ja kituvia, luontaisessa kilpailussa hävinneitä pienempiä puita.

Elävä latvus

Ulottuu alimmasta elävästä oksasta latvan huippuun.

Ilmakuiva puu tai sahatavara

Ulkoilmassa, sateelta suojassa puutavaran kosteus on 12...18 %. Usein ilmakuivalla tarkoitetaan puuta, jonka kosteus on 15 %.

Kehitysluokka

Metsien luokittelu kehitysvaiheen mukaan. Kehitysluokan avulla saadaan eri kasvupaikoilla ja eri puulajeja kasvavat metsät keskenään vertailukelpoisiksi.

Kuivaoksaraja

Elävän puun alimman näkyvän kuivan oksan kohdalla.

Latvuserros

Puut kasvavat metsikössä keskinäisestä kilpailusta johtuen eri pituisiksi ja näin muodostuu eri latvuserroksia.

Metsätyyppi

Metsämaa jaetaan pintakasvillisuuden perusteella eri luokkiin eli metsätyyppeihin. Kasvillisuuden perusteella maan ravinteikkuus määritellään esim. Etelä-Suomessa karuimmasta rehevimpään seuraavasti; VT puolukka, MT mustikka ja OMT käenkaali-mustikka.

Puun ikä

Puun siemenestä alkanut kasvuaika tarkasteluhetkeen asti.

Puun kambiaalinen ikä

Puun ytimeistä laskettu vuosilustojen määrä pintaa kohti.

Päätihakkuu eli avohakkuu

Metsän uudistamishakkuu, jossa ennen kylvöä tai istutusta poistetaan alueen puusto kokonaisuudessaan.

Suhteellinen viruma

Kappaleen pitkäaikaismuodonmuutoksen suhde kuormituksen aiheuttamaan elastiseen muodonmuutokseen.

Sulkeutunut metsä

Metsä, jossa eri puiden oksat tavoittavat toisensa.

Syrjäytetty puu

Se osa puustosta, joka jää valtapuuston varjoon. Yleensä välipuusto ja pienemmät.

Valtapuu, -sto

Sata paksuinta puuta metsähehtaarilla. Yleensä valtapuusto on myös puuston pisin osa ja sen latvus on eniten valossa. Seuraavat luokat ovat lisävaltapuu, välipuut ja aluspuut.

MERKINNÄT

A	poikkileikkauksen pinta-ala [mm ²] tai [m ²]
E	kimmomoduli [MPa]
E _f	kimmomoduli ASTM-standardin mukaan laskettuna [MPa]
E _G	kimmomodulin leikkauskorjattu arvo ASTM-standardin mukaan [MPa]
F	kuorma [kN] tai [MN]
F _m	murtokuorma [kN]
F _{p,est}	arvioitu plastisoitumisjännityksen arvo [kN]
G	liukumoduli ASTM-standardin mukaan [MPa]
I	jäyhyysmomentti [m ⁴]
L	jänneväli [m]
M	momentti [MNm]
P _{sk}	puunsyiden kyllästymispiste [%] tai [-]
Q	leikkausvoima [kN]
Q _t	rakenteen ominaiskuorma [kN]
Q _{max}	rakenteelta vaadittava kuormakestävyys [kN]
S _r	säteen suuntainen kutistuminen [%]
S _t	tangentin suuntainen kutistuminen [%]
W	taivutusvastus [m ³]
a	pistekuorman etäisyys tuelta [m]
b	sahatavaran leveys [mm] tai [m]
d	poikkileikkauksen koveruus [mm]
e	epäkeskisyyys [mm]
f _{bk}	taivutuslujuuden ominaisarvo [MPa]
f _{vk}	leikkauslujuuden ominaisarvo [MPa]
f _k	ominaistaivutuslujuus [MPa]
f _{kd}	puupylvään taivutuslujuuden laskenta-arvo [MPa]
f _m	murtolujuus [MPa]
h	sahatavaran poikkileikkauksen korkeus [mm] tai [m]
k	kaarevuussäteen käänteisluku [1/mm]
k _h	kerroin, jolla huomioidaan EC 5:n mukaisesti sahatavaran lujuuden kasvu, kun poikkileikkauksen suurin mitta on alle 150 mm
l	jänneväli, jossa vain taipuma aiheuttaa muodonmuutoksia [m]
l _k	kuormituspisteiden väli [m]
l _p	pinnan pituus, jolle tukireaktio jakantuu [mm]
m _m	kostean puun massa [g] tai [kg]
m _o	vedettömän puun massa [g] tai [kg]
m _v	veden massa [g] tai [kg]
r	kaarevuussäde
r	poikkileikkauksen pintalappeen etäisyys puun ytimestä [mm]

t	liukupinnan leveys [mm]
u	puun kosteus [%]
y	taipuma [mm]
w_k	kuormituspisteiden välisen alueen taipuma [mm]
w_l	taipuma jänneväliä l [mm]
w_o	mitattu taipuma palkin jännevälin keskikohdalla, tukien painuma huomioitu [mm]
w_1	mitattu taipuma palkin kuormituspisteen kohdalla, tukien painuma huomioitu [mm]
w_2	mitattu taipuma palkin kuormituspisteen kohdalla, tukien painuma huomioitu [mm]
α	palkin yläreunan ja vaakatason välinen kulma [°]
ϵ_o	alkusiirtymä
ϵ_x	suhteellinen muodonmuutos
γ	osavarmuuskerroin
ρ	kaarevuussäde
ρ_{15}	puun tiheys 15 %:n kosteudessa [kg/m ³]
σ_{ar}	jännitys kiilapalkin alareunassa [MPa]
σ_b	taivutusjännitys [MPa]
σ_{vr}	jännitys kiilapalkin yläreunassa [MPa]
σ_{\perp}	jännitys syidensuuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa [MPa]
$\sigma_{ }$	jännitys syidensuunnassa [MPa]
τ	leikkausjännitys [MPa]
τ_1	leikkausjännitys tasossa kappaleen pituussuuntaan [MPa]
τ_2	leikkausjännitys tasossa kappaleen pituussuuntaa vastaan kohtisuoraan suuntaan [MPa]

1 JOHDANTO

Suomalaisessa rakentamisessa ja saksankielisen kulttuurin alueella on puurakentamisen perinteisiin kuulunut järeän puun ja hirren käyttö. Nykyään kun tarvitaan pitkiä jännevälejä ja suurta kantavuutta, turvaututaan liimaamalla tai naulalevyjen avulla koottujen puurakenteiden käyttöön. Kustannusten kannalta katsottuna hintasuhde liimaamalla koottujen ja massiivipuukannatteen välillä on 3...4, kun sitä vastoin liimapuun L40:n taivutusvetolujuuden suhde T30 sahatavaraan on 1,43 ja kimmomodulin suhde 1,21. Kertopuulla vastaavat suhteet ovat 1,61 ja 1,35. Järeän puutavarakannatteen valmistusenergiasisältö on vain murto-osa liimaamalla kootun kannattimen energiasisällöstä. Massiivisen puutavaran saatavuus vain tilauksesta sekä puun halkeilu- ja kuivumismuodonmuutosominaisuudet koetaan haittana. Lisäksi järeästä puutavarasta valmistettujen rakenteiden liitos- ja asennustekniikka vaatii lisätutkimusta ja kehitystyötä.

Ympäriämme kasvavan uusiutuvan luonnonvaran jalostamiseksi ja hyödyntämiseksi olisi kehitettävä uutta tekniikkaa perinteisen rakentamistavan lisäksi. Kehitystyössä olisi painotettava myös energianäkökulmaa etsimällä ratkaisuja, joissa valmiiseen tuotteeseen sitoutuu valmistusvaiheessa mahdollisimman vähän energiaa. Kehittyvän puurakentamisen ja uusien sovellusten, kuten puukerrostalojen, tarpeisiin olisi aiheellista saada lisää kustannuksiltaan kilpailukykyisiä tuotevaihtoehtoja.

Varsinkin Etelä-Suomessa on järeän puutavaran (rungan läpimitta rinnan korkeudella yli 30 cm) määrä on lisääntynyt voimakkaasti. 1930-luvun lopussa järeää puuta oli runsas 5 % puuston kokonaistilavuudesta, nyt määrä on kohonnut yli 22 %:n. Koska rakennepuutavaran laatu riippuu saatavissa olevan raaka-aineen laadusta, olisi raaka-ainetuotannossa eli metsätaloudessa huomioitava, minkä laatuista puuta eri menetelmiä käyttäen saadaan. Laadun kannalta katsottuna metsien kasvattaminen ainoastaan niin, että niistä saadaan mahdollisimman paljon puuta merkitsee sitä, että puuston tietyt ominaisuudet, jotka vaikuttavat puun teknisiin ominaisuuksiin, heikkenevät. Kasvuolosuhteiden vaikutusta tutkittaessa on havaittu, että puun tekniset ominaisuudet ovat jossain määrin metsätyypistä riippuvaisia. Aikoinaan Suomen lentokonerakennusteollisuuden tarpeisiin käynnistetyissä, puun ominaisuuksia kartoittavissa tutkimuksissa todettiin, ettei esim. lentokoneiden rakentamisessa käytettyä mäntyä kannattanut etsiä Pohjois-Suomesta, vaan Etelä-Suomen puolukka- ja kanervatyppien metsistä.

Työn tavoitteena on tutkia järeän sahatavaran, jolla tässä tarkoitetaan yli 75 mm leveää ja yli 225 mm korkeaa sahatavaraa, mekaanisia ominaisuuksia kirjallisuuden perusteella ja kokeellisesti. Kirjallisuuteen perustuvassa osassa lähestymistavaksi valittiin puumateriaalin ja sen ominaisuuksien tarkastelu siten, että puun luontaiset ominaisuudet pystyttäisiin hyödyntämään järeässä sahatavarassa. Kasvavassa puussa lujuus kehittyy siten, että puuaine on tiheämpää ja lujempaa tyvässä sekä poikkileikkauksen ulkovyöhykkeessä. Kokeellisessa osassa pyrittiin alustavasti selvittämään, voidaanko järeä sahatavarakappale, jonka pituus ja poikkileikkauksen koko rajataan, luokitella lujuusluokkaan T30, jos se täyttää tietyt

yksinkertaiset kriteerit. Tällaisina ehtoina voisivat tulla kysymykseen mm. määrätty minimi-
leveys ja -korkeusmitat tai sahaustapa.

Pyöreän puun lujuusluokka on T30 /40/. Kun runko sahataan pienempiin kappaleisiin niin virheiden merkitys kasvaa ja sahatavara jaetaan neljään lujuusluokkaan T18, T24, T30 ja T40. Sahatavaralle määritetyt taivutuslujuuden ominaislujuusarvot on saatu kokeista, joissa koekappaleen koko on yleensä 50×100 tai 50×150 mm² ja jänneväli pieni. Tällöin pienikin syrjäoksa vaikuttaa vetovyöhykkeelle osuessaan ratkaisevasti kappaleen lujuuteen ja koesarjojen hajonta muodostuu suureksi. Pienistä, virheettömistä koekappaleista saatujen koetulosten ja sahatavaralla tehtyjen kokeiden tuloksien perusteella on esitetty teoria, että puukappaleen tilavuuden kasvattaminen pienentää sen lujuutta. Järeillä massiivipuupoikkeikkauksilla Suomessa tehdyistä kokeista ei ole tuloksia löytynyt ja muuallakin on kokeita tehty erittäin vähän mm. luotettavien tuloksien määrittämiseen vaadittavien pitkien koesarjojen kalleuden vuoksi. Johansson, Klinger ja Perstoper ovat tutkineet /29/ järeän kuusisahatavaran lujuuslajittelun ja mekaanisten ominaisuuksien vastaavuutta ja todenneet että ruotsalainen T-lujuuslajittelu aliarvioi järeän kappaleen lujuutta. He ovat tutkineet /14/ myös sahausaseman vaikutusta mekaanisiin ominaisuuksiin ja havainneet että ydinkeskeisellä sahatavaralla on huonommat mekaaniset ja kuivumis-muodonmuutosominaisuudet kun ytimen vierestä sahatulla. Madsenin /32/ mukaan on olemassa viitteitä siitä että sahatavaran leveyden kasvattaminen lisää sen taivutuslujuutta.

2 JÄREÄN SAHATAVARAN RAAKA-AINE

Suomessa on järeän, eli rinnankorkeusläpimitaltaan yli 30 cm, ja ylijäreän puun määrä jatkuvasti lisääntynyt. Vuosina 1936...38 järeää puuta oli 50 milj.m³ eli 5,4 % kokonaistilavuudesta, vuosina 1986...92 mitattu määrä oli 305 milj.m³ eli 22,5 % /1/. Etelä-Suomessa järeän kuusen kokonaistilavuus on n. 149 milj.m³ ja männyn 132 milj.m³. Rinnankorkeusläpimitaltaan yli 40 cm kuusta on noin 28 milj.m³, joka jakaantuu siten että luokassa 40...44 cm on 66 %, luokassa 45...49 cm 24 % ja luokassa yli 50 cm 10 %. Etelä-Suomessa on noin 3,5 milj.m³ latvaläpimitaltaan yli 40 cm:n kuusitukkeja. Järeiden kuusien määrä on kaksinkertaistunut metsien inventointien välisenä noin 10 vuoden aikana. Poikkeuksellisen suurta järeäytyminen on ollut Keski-Suomen, Satakunnan, Etelä-Suomen ja Lounais-Suomen metsälautakunnissa. Järeistä kuusista 83 % on yksityisten, 11 % valtion ja yhtiöiden sekä 6 % kuntien ja yhteisöjen omistuksessa. /2/

Tuotantolaitoksille tehdyn kyselyn perusteella merkittävintä järeän kuusitukin käyttö on levyteollisuudessa. Koska järeiden pölkkyjen käsittelyssä on joitakin ongelmia, järeän kuusen käyttö on vähäistä raaka-ainevaroihin nähden. Jos puun maksimiläpimittaa kasvatetaan nykyisestään, niin kuljettimet ja siirtolaitteet on uusittava. Mekaanisessa metsäteollisuudessa järeän kuusen tyvi täytyy sievistää, ettei tukki juuttuisi kiinni tai kuoriutuisi huonosti. Sellun tai kuumahierteen raaka-aineeksi haketettaessa hakkurin kita rajoittaa

tukin läpimittaa. Sahoilla tukkien maksimiläpimitta on usein 40 cm (37... 55 cm). Rajoituksen aiheuttaa kuorinnan tai sahauksen tai molempien läpäisymitta. Järeiden tukkien pyörösahaus on ongelmallisinta, vannesahalla maksimiläpimittaa voidaan nostaa. Järeistä tukeista sahatuissa sydäntavaroissa on erityisesti kuivumis- ja käsittelyhalkeamia. Vaneriteollisuudessa kuusitukin suuri paksuus lisää viilun särkymisiä, kuivien oksien irtoamisia sekä liimauksen epätasaisuutta. Viilun heikkouden perussyyt ovat kuivan sydänpuun suuri osuus, paksut vuosilustot ja kuivat oksat. /2/

Järeän kuusitukin kuljetus on kallista, koska sitä käyttäviä laitoksia on harvassa. Järeitä kuusia on leimikossa harvassa ja ne vaativat erilliskäsittelyä. Kuljetuskustannus on erityisen suuri, kun järeät kuusitukit kuljetetaan sahoille ja lajitellaan erilleen käyttöä varten. Massa- ja vaneriteollisuuden toimitettavan kuusitukin seassa olevan järeän kuusitukin kuljetus käy hyvin, sillä nämä laitokset voivat käyttää molemmat yhdessä eikä erillään pitoa tarvita. Jos järeät kuusitukit kuljetetaan erikseen, ne on usein keräiltävä pienistä eristä samalla kun kuljetusmatkat kasvavat. /2/

Järeän tukin korkeampia käsittely ja kuljetuskustannuksia voidaan korvata nostamalla valmiin tuotteen jalostusarvoa. Samalla kun tuotteeseen sitoutuu työtä ja osaamista, raaka-aineen hinnan osuus lopputuotteen hinnasta pienenee. Kevyen ja luotettavan kenttäkaluston kehittäminen vähentäisi kuljetustarvetta ja lyhentäisi tuotantoketjua, sillä tukki olisi mahdollista jalostaa valmiiksi tuoteaihioksi jo alkulähteillään.

Metsän kasvatuksessa ja hoitotoimenpiteiden valinnassa ei pitäisi kiinnittää huomiota vain puuston kuutiokasvuun, vaan myöskin siihen millaista puu on laadultaan. Massateollisuuden tarpeista lähtevä puuston suuri kuutiomäärän kasvu merkitsee useimmiten myös järeytymisen suosimista laadun kustannuksella. Tukkipuun laatuun voidaan kuitenkin vaikuttaa metsänhoitotoimenpiteillä. Karsiminen ja muut puun laatua parantavat toimenpiteet kannattaa kohdistaa vain saha- tai vaneriteollisuuden raaka-aineeksi tarkoitettuun puustoon, sillä massateollisuuden raaka-aineeksi tarkoitettujen puuston laadun parantaminen mm. oksikkuutta vähentämällä on hukkatyötä. Melko myöhään aloitettavat harvennukset ja paraslaatuisten, joskus verraten pienikokoistenkin puiden suosiminen aiheuttavat menetyksiä massatuotossa sekä puiden järeydessä. /3/

Metsikön synty tapa vaikuttaa myös puuston laatuun. Esim. viljelymänniköt tuottavat jo sellaisenaan laadultaan huonompaa, oksaisempaa puuta kuin luonnonsiemennyksestä syntyneet. Varsin selvä laatuero on myös kylvön ja istutuksen välillä, sillä kylvömetsiköt ovat yleensä laadultaan parempia. Viljelymännikössä tiheidenkin istutusvälien ollessa kyseessä tarvitaan aina karsimista apuna pyrittäessä yhtä aikaa korkeaan kuutiomäärään ja hyvään laatuun. /3/

3 PUUN KASVUBIOLOGIA

Puun kasvubiologian tunteminen on tärkeää, sillä puun kasvuolosuhteet ja -ympäristö vaikuttavat perinnöllisten tekijöiden lisäksi muodostuvaan puuainekseen ja tätä kautta suoraan järeän sahatavaran laatuun. Puu on luonnossa kasvanut materiaali ja sillä on ominaisuuksia, jotka ovat välttämättömiä kasvavalle puulle, mutta joita valmiissa puutavarassa pidetään vikoina. Rakennepuutavarassa näitä vikoja, kuten oksia, hyväksytään tietyissä rajoissa lajittelun perusteella.

Puun eri osat ovat sopeutuneet omiin tehtäviinsä. Rungon, juurien ja oksien rakenne on erilainen, omaan erikoistehtäväänsä soveltuva. Puulla on kuitenkin mukautumiskykyä ja tarpeen vaatiessa jokin osa voi ottaa toisen tehtävän, esim. latvan katketessa jokin sivuoksisista kääntyy ylöspäin, muodostaa uuden latvan ja muuttaa sisäistä rakennettaan sen mukaan. Jos tasapitkässä, tiheässä metsässä kasvaneen puun ympäriltä kaadetaan muut puut ja se jää siemenpuuksi, yksinäiseen ja tuulille alttiiseen asemaan, puu alkaa vahvistaa tukijuuriaan ja rungon alaosa voidakseen vastustaa lisääntyntä tuulen painetta. Puun mukautumiskykyä rajoittaa kuitenkin se että kaikki ne solukot, jotka ovat jo puutuneet, eivät voi enää rakenteeltaan tai muodoltaan muuttua vastaamaan uutta tilannetta. Ainoastaan solukot, jotka syntyvät olosuhteiden muutoksen jälkeen, voivat muodostua uusien vaatimusten mukaisiksi. Tällaiset muutokset edellyttävät aina tarpeeksi suuren ja pitkäaikaisen kiihokkeen olemassaoloa /4/. Käytännössä solun muutos tapahtuu kahdella tavalla ja usein molemmilla samanaikaisesti:

- uusien solujen rakenne voi olla erilainen, niiden muoto, koko, keskinäinen asema tai seinämän vahvuus muuttuu
- solujen muodostamat kerrokset eli vuosilustot voivat muuttua vahvuudeltaan tai sijainniltaan, johonkin määrättyyn puun osaan kasvaa entistä vahvemmat tai ohuimmat vuosilustot.

Puun solut eivät yleensä noudata rungon pituusakselin suuntaa, vaan ovat järjestäytyneet ytimen ympärille loivaan spiraaliin. Kierteisestä kasvusta johtuva vinosyisyys on kasvavalle puulle luonnollinen ilmiö. Puun pinnalla havaittava kierteisyys ei ole vakio koko rungossa, vaan muuttuu ytimeä lasketun eli kambiaalisen iän kasvaessa /5/. Kullakin puulajilla on sille ominainen kierteinen kasvutapa. Männyn kierteisyys alkaa hyvin loivana, mutta saavuttaa nopeasti maksimiarvon vasenkierteisyytenä 15...20 vuoden iässä. Tämän jälkeen kierteisyys vähenee ja muuttuu oikeakierteisyydeksi puun ollessa 60...80 vuoden ikäinen. Kuusen kierteisyys on lievää ja sen muutokset ovat huomattavasti pienempiä kuin männyn, vaikka alkuvuosien selvä muutos ja vanhemman iän oikeakierteisyyden lisääntyminen onkin havaittavissa. Kuusella esiintyy joskus äkillisiä muutoksia, joissa jopa kierteisyyden suunta saattaa muuttua.

Kukin puuyksilö eroaa jossakin määrin kaikista muista puista sekä ulkomuodoltaan että sisäisiltä ominaisuuksiltaan, vaikka useat perusominaisuudet ovat perinnöllisiä. Kasvun

aluksa puun kehityksen määräävin tekijä on perinnöllisyys, mutta myöhemmin ympäristön merkitys korostuu. Ympäristöön kuuluvien eri kasvutekijöiden vaikutusta puuhun ei tarkalleen tunneta, sillä tieteelliset kokeet ovat vaikeita puun pitkän kehitysiän vuoksi. Ulkonaisista olosuhteista etenkin ilmasto, maaperä ja puun asema vaikuttavat puun ominaisuuksiin. Olosuhteiden vaikutukset puun ominaisuuksiin ovat usein toisiinsa niin kytkeytyneet, että erikseen kunkin tekijän vaikutusta on vaikea todeta. Tutkittaessa eri tekijöiden vaikutusta muodostuvan puuaineksen laatuun havaitaan, että jos jokin tekijä on optimia huonompi, voi sitä jossain määrin korvata jonkin toisen tekijän optimia paremmat olosuhteet, mutta lopputulos ei ole yhtä hyvä kuin jos molemmat tekijät olisivat optimissaan. Esim. ilmastolliset kasvutekijät voivat jonkin verran korvata maaperästä riippuvien tekijöiden puutetta ja päinvastoin. Lopputuloksen määrää kaikkien tekijöiden yhteisvaikutus. Suuren havaintoaineiston perusteella voidaan kuitenkin sanoa että samanlaisissa olosuhteissa kasvaa samanlaisia puita. Männyen ilmasto-optimi on Keski-Suomi, maanlaatuoptimi puolukkakangas ja asemaoptimi kolmas latvusluokka. Etelä-Suomessa maanlaatuoptimi siirtyy kanervatyypille ja Pohjois-Suomessa mustikkatyypille. Kuusen ilmasto-optimi on Etelä-Suomessa. Kuusen laatu paranee pohjoisesta etelään päin siirryttäessä eikä käännekohtaa näy Suomen alueella. /6/

Suomessa on kolme männyen maantieteellistä päärotua, jotka poikkeavat toisistaan laadullisesti. Pohjois-Suomen männyllä elävän latvuksen alaraja ja kuivaoksaraja ovat Keski- ja Etelä-Suomen mäntyä alempana. Pohjois-Suomen mäntymetsiköissä kapealatuksiset yksilöt ovat yleisiä. Keski- ja Etelä-Suomen männyllä on tyypillistä suora runko, karkeahko oksisto ja kapea latvus. Eteläisen ja lounaisen rannikkoalueen mänty on edellisiä leveälatvuksisempi ja elävän latvuksen alaraja ja kuivaoksaraja ovat aiemmin esitettyjä alempana. Keski- ja Etelä-Suomen mäntyä voidaan pitää laadullisesti normaalitapauksena. Suomessa on kaksi kuusen maantieteellistä päärotua. Pohjois-Suomen kuusella on kapea latvus ja oksat ulottuvat usein maahan saakka. Keski- ja Etelä-Suomen kuusen latvus on leveä ja oksat karsiutuneet korkeammalle kuin pohjoisella rodulla. Keski- ja Etelä-Suomen kuusta voidaan pitää laadullisesti normaalitapauksena /7/. Hakkilan tutkimusten mukaan /8/ pohjoisessa puulajien runko kapenee voimakkaammin kuin etelässä.

Koska puun asema naapuripuihin nähden ja metsikön tiheys vaikuttavat muodostuvaan puuainekseen, voidaan metsänhoitotoimenpitein vaikuttaa syntyvän puun laatuun /6/. Staattisessa tilanteessa puut ovat tyvekkäitä avoimilla kasvupaikoilla ja täyteläisiä sulkeutuneessa metsässä, tosin muotoeron suuruus riippuu huomattavasti puulajista /9/. Metsää harvennetaessa kasvu lisääntyy rungon alaosassa ja voi jopa heikentyä yläosassa. Elävien oksien karsinta vaikuttaa päinvastoin, kasvu vähenee rungon yläosassa vähemmän kuin alaosassa tai jopa lisääntyy, joten runkomuoto paranee.

3.1 Kasvuolosuhteiden vaikutus puun tiheyteen

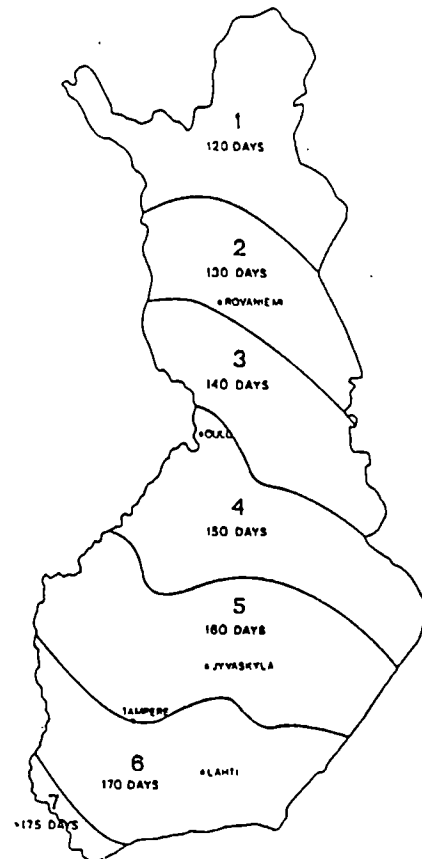
Puun huokoisuus vaikuttaa puun tiheyteen eli tilavuuspainoon ja sitä kautta puun lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiin. Tiheyserot johtuvat maantieteellisistä ja kasvupaikkaeroista,

tosin maantieteelliset tekijät säätelevät suuresti kasvupaikkatekijöitä. Maantieteelliset tekijät vaikuttavat lämpötilaan, sademäärään ja tuulisuuteen. Esim. tiheys pienenee, kun kasvupaikan korkeus merenpinnasta kasvaa. Kasvupaikkatekijöitä ovat maaperä ja ympäristötekijät, esim. tiheä - harva puusto, joka vaikuttaa mm. oksaisuuteen. Pohjoisissa oloissa on havaittu että puun eteläpuolella puuaine on tiheämpää kuin pohjoispuolella, ero on suuruusluokaltaan n. 3 kg/m^3 /9/. Kasvupaikan lisäksi geneettinen vaihtelu on eräs tiheyseroja aiheuttava tekijä /10/.

Suomessa pohjoisen puusto eroaa tiheydeltään eteläosan puustosta. Hakkilan aineiston mukaan /11/ männyn tiheys on pienestä kesäpuupitoisuudesta johtuen alhaisimmillaan pohjoisissa ilmastovyöhykkeissä 1 ja 2, kuva 1. Kuusen tiheys on hitaamman kasvun seurauksena pohjoisissa vyöhykkeissä 2 ja 3 korkeampi kuin Etelä-Suomessa, eroa kesäpuupitoisuudessa ei havaittu. Männyn kuiva-tuoretiheys on Hakkilan aineiston mukaan ilmastovyöhykkeellä 2 keskimäärin 392 kg/m^3 ja ilmastovyöhykkeellä 6 vastaavasti 412 kg/m^3 . Kuusen vastaavat arvot ovat 401 ja 381 kg/m^3 . Viljavilla kasvupaikoilla tiheys on kaikissa ikäluokissa alhaisempi kuin karujen maitten hidaskasvuissa rungoissa. Esimerkiksi OMT:n ja VT:n puustojen välinen ero puuaineen tiheydessä on Etelä-Suomen 51...100 vuotiaissa metsissä männyissä 5 % ja kuusissa 8 % /11/. Soilla havupuitten, etenkin kuusen tiheys on erittäin hitaan kasvun seurauksena alhaisempi kuin kangasmaalla. Kehitysluokittain puuston tiheys myötäilee eroja kasvunopeudessa ja ikäluokissa. Puusto on kevyintä taimistoissa ja riukuasteen metsissä kehitysluokissa 2 ja 3. Raskainta puusto on vastaavasti kitu- ja joutomaitten kehitysluokassa 0. /11/

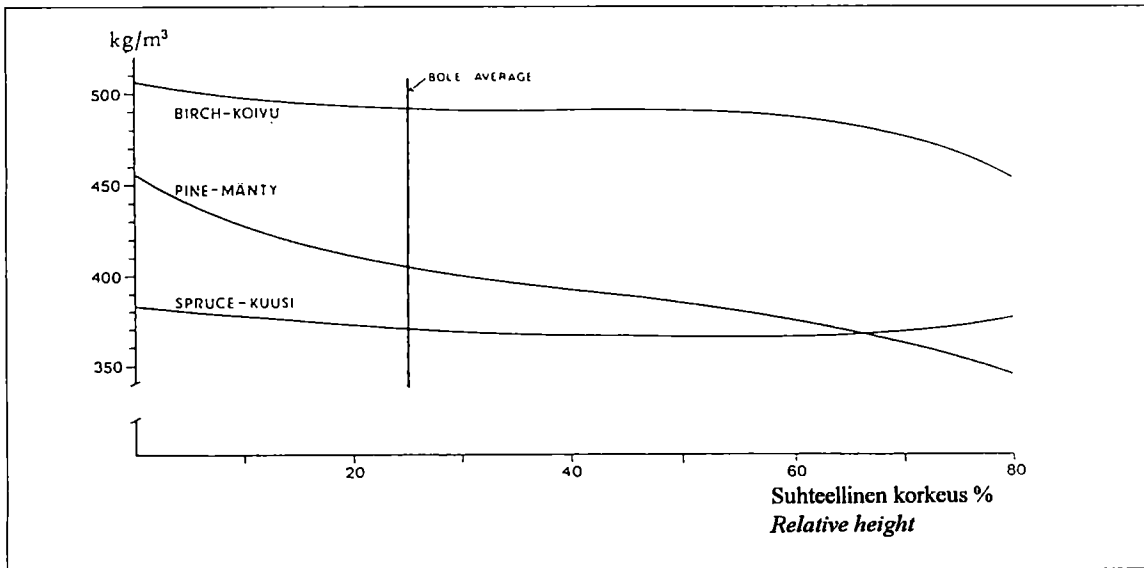
Parhaat selittäjät sekä runkojen että metsiköiden väliseen tiheysvaihteluun olivat kasvunopeus ja ikä. Kehittyvän kuusipuun tiheys lisääntyy puun iän kasvaessa ja kasvunopeuden hidastuessa. Kasvunopeuden eroista johtuu että tietyn iän saavuttaneessa viljelykuusikossa puuaineen tiheys on alhaisempi kuin luontaisesti syntyneissä nykymetsissämme vastaavassa iässä. Hakkilan tutkimuksen /12/ perusteella vertailtavien aineistojen ero oli keskimäärin 5 %.

Eri puulajien puuaineen tiheys vaihtelee, samoin vaihtelee saman puulajin eri yksilöiden tiheys ja jopa tiheys saman rungon eri kohdissa. Kuvassa 2 on esitetty männyn, kuusen ja koivun tiheyden vaihtelu rungon pituus suunnassa. Männyn keskimääräinen rungon



Kuva 1. Termisen kasvukauden pituuteen perustuvat ilmastovyöhykkeet. /11/.

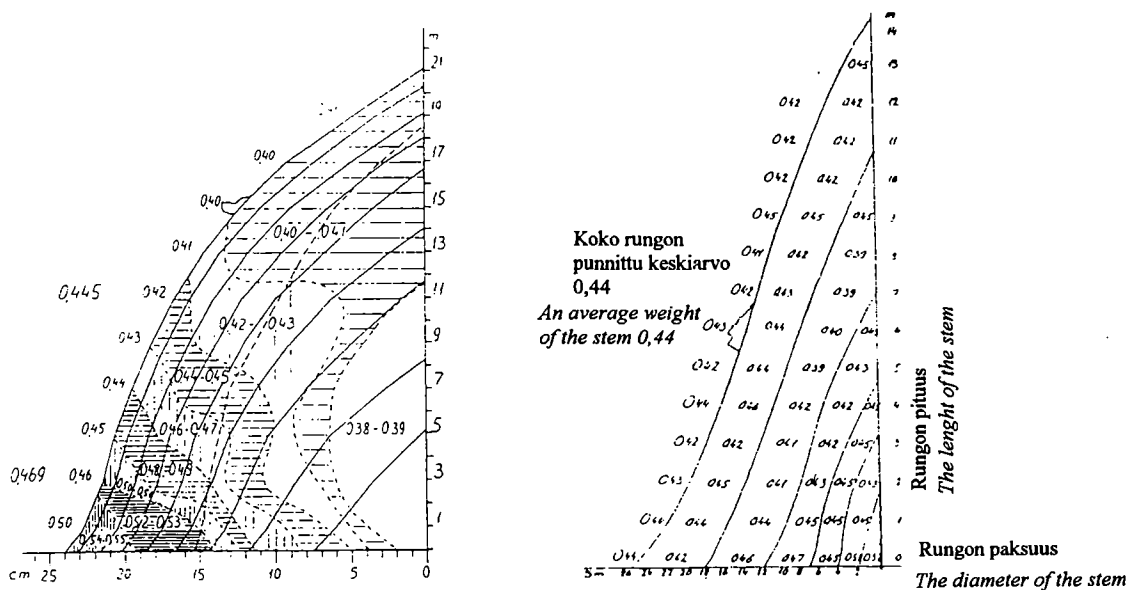
Figure 1. The climatic zones according to thermal growing period.



Kuva 2. Puuaineen tiheyden vaihtelu rungon pituussuunnassa Etelä-Suomessa. Puitten ikä 40..80 vuotta. /11/
Figure 2. The variation of wood density along the log in Southern Finland. The age of the trees is 40-80 years.

tiheys alenee tyvestä latvaan päin ja latvapäässä tiheys on vain n. 80 % tyvipään tiheydestä /6/. Kuusen puuaineen tiheys alenee verraten vähän tyvestä latvaan päin.

Männyn tiheys kohoaa selvästi, mutta hidastuen ytimestä pintaan päin. Se kääntyy laskuun noin satavuotiaissa männyissä. Ytimen läheisyydessä tiheys pysyy suunnilleen samana tai alenee tyvestä latvaan päin. Kuvasta 3 nähdään männyn ja kuusen tiheyden vaihtelu rungon eri osissa. Männyn kasvunopeudessa on optimi, jossa tihein puu muodos-



Kuva 3. Esimerkki männyn ja kuusen tiheyden vaihtelusta rungon eri osissa. Rungon punnitut keskiarvot ovat 445 ja 494 kg/m³. 6 m pitkän mäntytyvitukin tiheys on 469 kg/m³. /6/

Figure 3. An example of variation of wood density in different parts of the pine and spruce log /6/.

tuu ja se vaihtelee eri latvuskerroksilla. Jos kasvunopeus hidastuu tai kiihtyy tästä optimista, muodostuu keveämpää puuainesta. /6/. Koska männyn tiheys alenee kasvupaikan parantuessa eli kasvunopeus ja tiheys korreloivat negatiivisesti, niin kaikki ne tekijät, jotka lisäävät kasvunopeutta vaikuttavat tiheyttä alentavasti. Jalavan tutkimuksen /6/ mukaan mäntymetsässä syrjäytettyjen puiden puuaines on niin hyvää, että näihin puihin olisi kiinnitettävä enemmän huomiota ja harkittava tarkoin mitä puita harvennushakkuissa poistetaan.

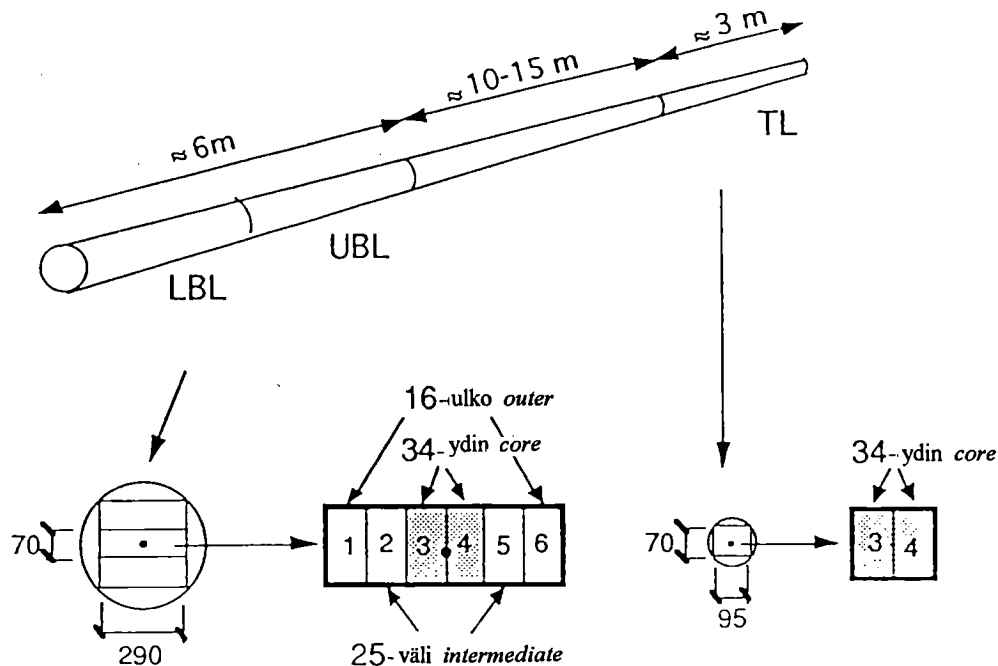
Kuusen tiheyden vaihtelu ytimen ja pinnan välillä on vähäistä. Ensin se pienenee ytimestä lähtien, mutta kasvaa lähestyttäessä pintaa /9/. Parhailta kasvupaikoilla kuusen tiheys alenee 10 %. /10/

3.2 Puun taivutuslujuus- ja kimmo-ominaisuudet rungon eri osissa

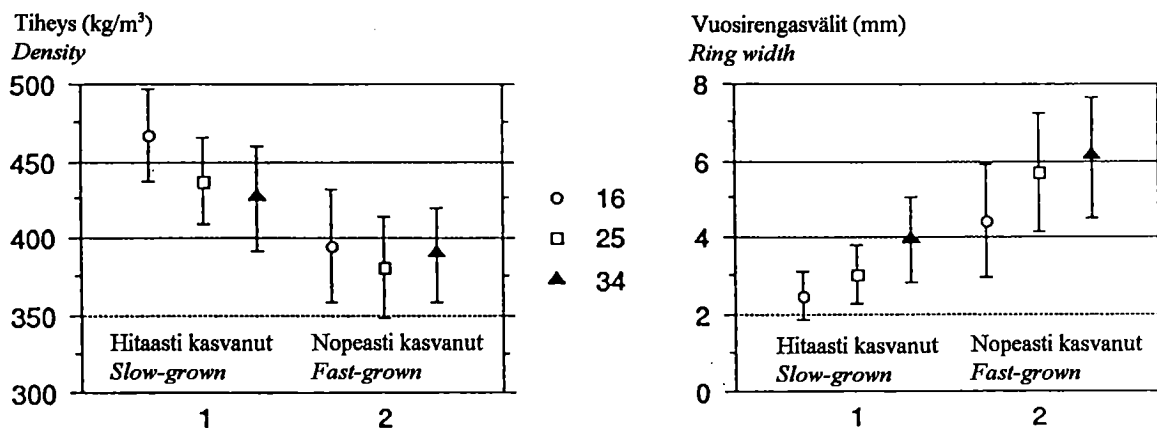
Kuusi on painoonsa verrattuna lujin puulajimme, esim. sen puristuslujuuden suhde tiheyteen on parempi kuin männyn tai koivun. Männyn lujuuksien, kuten muidenkin ominaisuuksien hajonta on suuri, kuusen lujuus ym. ominaisuudet vaihtelevat paljon vähemmän kuin männyn. /6/

Taivutuslujuus lisääntyy suoraviivaisesti tiheyden kasvaessa, mutta Kärkkäinen on todennut /13/ että tiheyden ollessa sama on ohutlustoinen kuusi lujempaa kuin paksulustoinen. Puun tiheys pienenee vuosiluston levetessä, mutta riippuvuus on niin heikko, ettei sillä ole käytännön merkitystä pyrittäessä erottamaan puutavaran tiheysluokkia toisistaan luston leveyden perusteella. Tiheyden ollessa sama pohjoissuomalainen kuusi on lujempaa kuin eteläsuomalainen, tiheyden vaikutuksen eliminoinnin jälkeen luston oheneminen lisää taivutuslujuutta. Kuusta lannoitettaessa, jolloin vuosilusto levenee, suhteellinen lujuus (lujuus jaettuna tiheydellä) pienenee. Kärkkäisen mukaan vuosiluston leveys yksinään ei ole hyvä taivutuslujuuden selittäjä, sillä olennaista ei ole kasvunopeus, vaan kuhunkin vuosilustoon tuleva aineen määrä. Tiheys on ensisijainen lujuustekijä ja sen antamaa informaatiota voidaan täydentää vuosiluston leveydellä. Vuosiluston leveyden ollessa sama kuusen tiheys alenee etelästä pohjoiseen. Kärkkäisen tutkimuksen mukaan vuosiluston leveyden perusteella ei voida ennustaa tiheyttä, joten Suomen oloissa ei ole perusteltua valikoida puutavaraa pelkän kasvunopeuden perusteella eri tiheysluokkien saamiseksi. Hänen tutkimuksensa jokaisen lustonleveysluokan sisällä tiheys vaihteli enemmän kuin luokkien välillä.

Klinger, Perstoper ja Johansson /14/ ovat tutkineet kuusen (*Picea abies*) taivutuslujuus- ja kimmo-ominaisuuksia puun eri osissa. Säteittäisen sijainnin vaikutusta vertailtiin vain hidas- ja nopeakasvuisten tyvitukkien kesken. Koekappaleet oli jaettu kolmeen ryhmään kuvan 4 mukaisesti. Koekappaleita ei lajiteltu ennen kokeita, vaan kaikki sahatut koekappaleet kuormitettiin riippumatta oksien, halkeamien tai muiden vikojen määrästä tai suuruudesta. Tämän vuoksi koetuloksista ei ole määritetty taivutuslujuuden arvoa 5 % fraktiilin kohdalta. Koekappaleiden lajittelu olisi vaikuttanut tuloksiin erityisesti jakauman alapäässä ja pienentänyt koetulosten hajontaa. Kuvassa 5 on esitetty koekappaleryhmien tiheysvaihtelu ja vuosirengasvälit.

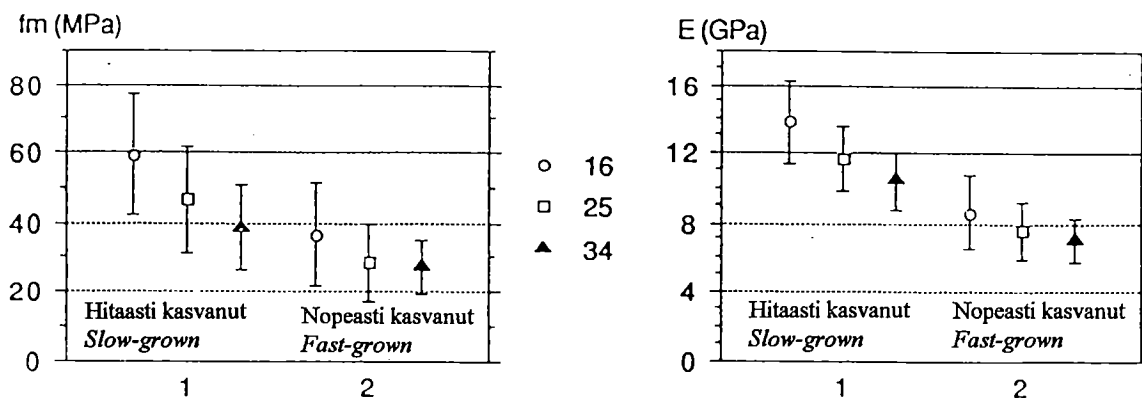


Kuva 4. Koekappaleiden sahaus, sijainti säteen suunnassa ja ryhmittely. LBL ja UBL ovat tyvitukkeja ja TL latvatukki. Ryhmässä 16 ovat pinta-, ryhmässä 25 väli- ja ryhmässä 34 ydinkappaleet. /14/
Figure 4. Sawing pattern of the specimen /14/.



Kuva 5. Koekappaleiden tiheydet (density) ja vuosirengasvälit (ring width) hidas- ja nopeakasvuissa koekappaleissa ryhmittäin. /14/
Figure 5. The density and the ring widths for the specimen, fast grown and slow grown trees /14/.

Koetuloksista nähdään selvä säteen suuntainen vaihtelu sekä taivutuslujuuden f_m että kimmomodulin E arvoissa, kuva 6. Taivutuslujuuden ja kimmomodulin arvot ovat alimmillaan lähellä ydintä ryhmässä 34. Ryhmissä 25 ja 16 ne kasvavat kun etäisyys yttimeen kasvaa. Lähellä pintaa otetuissa koekappaleissa f_m on 47 % ja E 30 % korkeampi kuin ytimen vierestä otetuissa. Mekaanisten ominaisuuksien paraneminen ytimestä pintaan päin on paljon merkittävämpää hidas- kuin nopeakasvuissa koekappaleissa.



Kuva 6. Taivutuslujuuden f_m ja kimmomodulin E vaihtelu säteen suunnassa. /14/

Figure 6. The variation of bending strength (f_m) and modulus of elasticity (E) in outer, intermediate and core section /14/.

Hidaskasvuisen kuusen f_m on 57 % ja E 54 % korkeampi kuin nopeakasvuisen. Pituussuunnassa sekä f_m että E kasvavat tilastollisesti merkittävästi tyvestä latvaan päin ytimen vierestä otetuissa kappaleissa. Eroa ei kuitenkaan ole, jos vertailuun otetaan mukaan myös tyvitukin pintakoekappaleet. Tämä tulos johtuu siitä, että ytimen läheisyydessä puun ominaisuudet muuttuvat niin, että latvassa puuaines on tiheämpää ja vuosirengasväli pienempi kuin tyvessä. Sydänpuun muodostumisella ei havaittu olevan vaikutusta mekaanisiin ominaisuuksiin.

3.3 Puun kasvujännitykset

Elävissä rungoissa esiintyy kasvujännityksiä. Rungon ulkopinnalla vallitsee syiden suunnassa vetojännitys, tangentin suunnassa puristusjännitys ja säteen suunnassa vetojännitys. Syvenmällä rungossa syiden suunnassa vallitsee puristusjännitys. Kun säteen pituutta merkitään 1:llä niin jännityksen suunta muuttuu noin 0,6 etäisyydellä. Samassa puulajissa tiheyden kasvaminen näyttää voimakkaasti lisäävän kasvujännityksiä. Ehyissä tukeissa kasvujännitykset saattavat säilyä yli 20 vuotta ja tukeista saatuissa kappaleissa saattaa myös olla laukeamatonta jännitystä eli kasvujännityksiä voidaan havaita myös valmiissa sahatavarassa. Havupuiden kasvujännitykset ovat yleensä sen verran pieniä, ettei niillä katsota olevan merkitystä sahatavaran muodonmuutoksissa. /9/

3.4 Oksaisuuteen vaikuttavat tekijät

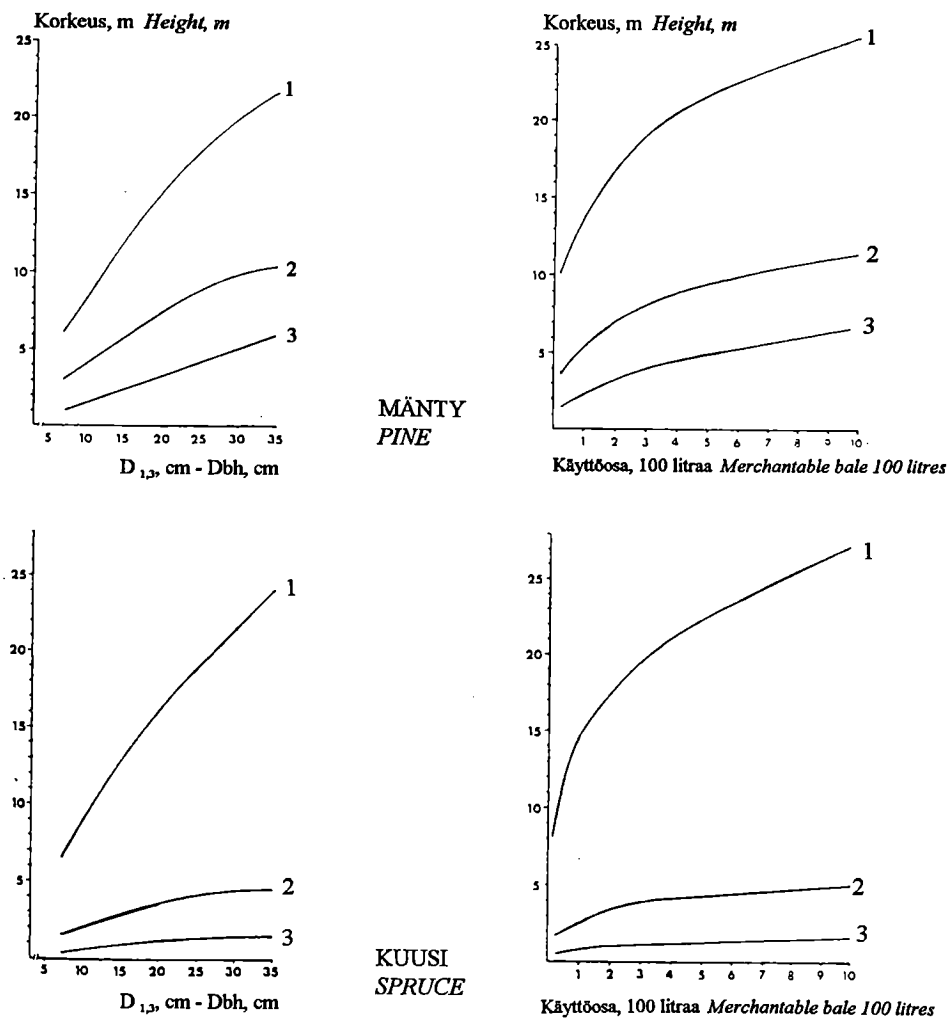
Oksaisuus on se ominaisuus, joka ratkaisee voidaanko jostain metsiköstä saada laadultaan korkea-arvoisia, hyvää sahatavaraa antavia tukkeja. Yleensä harvennukset suosivat jo sellaisenaan oksikkaampia valtapuita, joista saattavat tukit ovat tutkimusten mukaan /3/ laadultaan heikompia kuin alempien latvuserosten puista saattavat. Kun metsiköstä poistetaan usein varsin aikaisessa vaiheessa alempien kerrosten puut, kehittyvät sen jälkeen

harvassa kasvavat valtapuut entistä oksikkaammiksi. Jos puu on nuorena kasvanut nopeasti paksuutta, kehittyvät sen oksat vahvoiksi. Ne pysyvät pitempään elinvoimaisina kuin ohuet oksat ja kuoltuaankin ne säilyvät pitkään rungossa katkeamatta. Liiallista oksikkuutta ei voida kuitenkaan pitää yksinomaan liian väljän kasvutilan syynä, vaikka on osoitettu, että vallitsevan latvuserroksen puut ovat suurioksisia verrattuna vallittuihin puihin. Puiden oksaisuuteen vaikuttavat myös monet muutkin tekijät kuin kasvutila, sillä esim. männikössä kasvupaikan laadulla on suurempi vaikutus kuin kasvutilalla. Myös puun riittävä pituuskasvu vastustaa liiallista oksittumista.

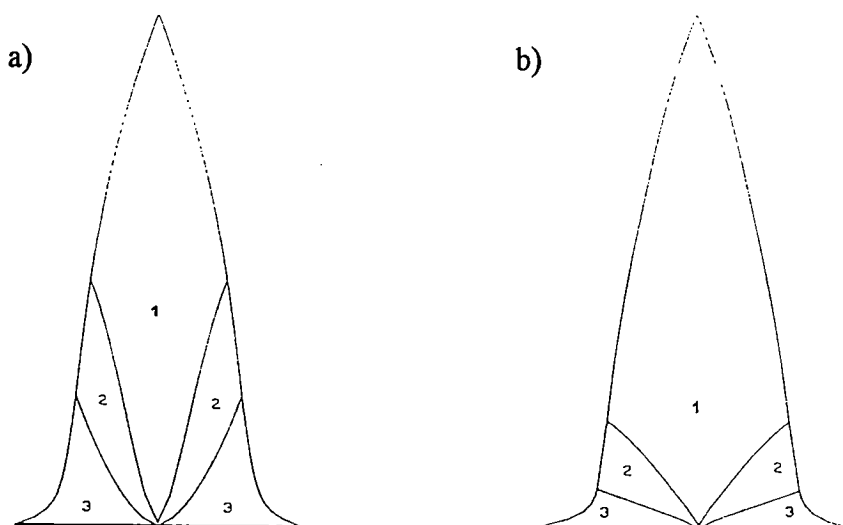
Männyn oksien kehitykselle tärkein vaihe on todettu olevan ajanjakso ennen latvuksen sulkeutumista. Mitä kauemmin oksat saavat aikaa kasvaa ennen latvuksen sulkeutumista sitä paksumpia niistä kehittyy. Tuoreen, elävän latvuksen pituus on sitä pienempi, mitä tiheämmässä puut kasvavat. Jos halutaan todella hyvää ja korkealaatua puuta, ei tiheänä kasvatus riitä, vaan on turvaututtava karsimiseen /3/. Optimaaliseksi männyn kasvatustiheydeksi on todettu 2000...5000 puuta hehtaarilla. Oksien läpimitan pieneneminen vaihtelee metsätyypeittäin ja suurimmat erot eri kasvatustiheyksien välillä on OMT- eli rehevällä käenkaali-mustikkatyypillä. Oikein tehty ja ajoitettu pystykarsinta lisää oksattoman rungon osan tilavuutta huomattavasti. Harvoissa taimikko- ja riukuvaiheen metsiköissä ei puun laatua voida pystykarsinnalla parantaa. Tiheissä metsiköissä pystykarsinta ei kannata, sillä oksatonta puuainesta kehittyy runsaasti puiden karsiutuessa luontaisesti /7/. Vuosiluston vahvuus ytimen lähimmässä ympäristössä on varsin hyvä havupuiden sisäisen oksaisuuden osoittaja. Mitä paksumpia lustot ovat, sitä oksaisempia tukit ovat. /3/

Puun kyhmytön osa on sitä pitempi mitä paksumpi ja vanhempi se on. Oksaton osa, siis kyhmytön ja kyhmyinen osa yhteen laskettuna, on pisin vanhimmissa ikäluokissa. Oksaton osa on verraten lyhyt pienissä rungoissa, kasvaa sitten mutta alkaa taas lyhetä kaikkein paksummissa puissa. Latvus on sitä pitempi mitä paksumpi puu on ja tämä pitää paikkansa myös latvuksen suhteelliseen pituuteen nähden. Suurin oksa sekä tyviosassa että koko sahapuuosassa on kaikissa ikäluokissa sitä suurempi, mitä paksumpi puu on. Oksaton osa on kaikissa paksuusluokissa sitä lyhyempi, mitä nopeammin puu on kasvanut nuorena paksuutta. Kuvassa 7 on esitetty männyn ja kuusen elävien ja kuolleiden oksien alaraja rinnankorkeusläpimitan ja käyttöosan tilavuuden avulla.

Kuusen oksaton rungonosa on selvästi lyhin, kuva 8. Männyn kuivat oksat alkavat keskimäärin ylempää kuin samankokoisen kuusen elävät oksat. Pohjoisessa puut ovat lyhyempiä kuin etelässä ja kuolleet oksat alkavat siellä vastaavasti alemmalla. Elävien ja kuolleitten oksien alarajan korkeus vaihtelee kuusissa huomattavasti vähemmän kuin männnyissä. Latvussuhde eli elävän latvuksen pituuden suhde puun koko pituuteen on männnyissä keskimäärin 55 % ja kuusissa 80 % /7/.



Kuva 7. Etelä-Suomen männyn ja kuusen koko pituus (1) sekä elävien (2) ja kuolleitten (3) oksien alaraja rinnankorkeuslähimittaan ja käyttöosan tilavuuden funktiona. /8/
Figure 7. The length (1) of South-Finnish pine and spruce and the line of green (2) and loose knot as a function of the diameter Dbh, cm /8/.



Kuva 8. Eteläsuomalaisen rinnankorkeuslähimitaltaan 27 cm olevan a) männyn ja b) kuusen rungon halkileikkaus. 1 = terveoksainen osa, 2 = kuivaoksainen osa ja 3 = oksaton osa. /15/
Figure 8. The cross section of a) a pine b) a spruce from southern Finland. 1 = green knots, 2 = loose knots and 3 = without knots.

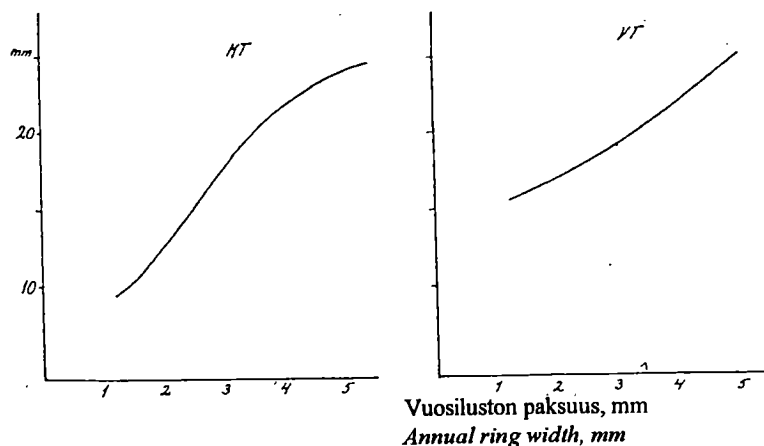
Pääpuulajeistamme kuusi on ohutoksisin. Männyn oksat ovat pohjoisessa paksumpia kuin etelässä, kuusen osalta asia on päinvastoin /8/. Männyn oksat ovat oksakiehkuroissa, mutta kuusessa on lisäksi oksakiehkuroiden välissä välioksia. Oksien lukumäärään (1...10) oksakiehkurassa vaikuttaa eniten puun perimä. Esim. puun rodullinen vaihtelu on männyissä suuri eikä esim. metsän tiheys juurikaan vaikuta siihen /15/. Kuusen välioksat eivät kehity läpimitaltaan yhtä suuriksi kuin oksakiehkuroissa olevat oksat. Oksakiehkuroiden välimatka rungossa on yhtä suuri kuin puun vuotuinen pituuskasvu. Kuusen kasvutavasta johtuen kuusen rungossa on paljon samankokoisia ja erityisen paljon pieniä oksia. Kuusen kehitys on hitaampaa kuin männyn, joten kuusi jää nuoruusvaiheessa kasvupaikan alemmaksi latvuserrokseksi. Tällöin oksat kehittyvät terveessä puussa harvoin niin suuriksi, että ne alentaisivat tulevan tukkipuun laatua. Latvan katkeamisen jälkeisessä ranganvaihdossa syntyvät poikaoksat ovat useimmiten rungon muita oksia suurempia. On esitetty, että jos kuusitukissa havaitaan yksi sallittua suurempi oksa, on erittäin todennäköistä, että samassa tukissa on useampia sallittua oksaa suurempia oksia /7/. Rinnankorkeusläpimitaltaan samansuuruisissa puissa oksat ovat sitä paksumpia, mitä voimakkaammin puu kapenee eli mitä pienempi puu on tilavuudeltaan /8/.

Männyissä suurin oksa on hieman rungon puolivälin yläpuolella mutta kuusissa jo 40 % korkeudella ja järeissä puissa vieläkin alempana. Järeissä, rinnankorkeusläpimitaltaan yli 35 cm:n puissa, kuusen suurimman oksan läpimitaksi on mitattu 30...40 mm ja männyn vastaavasti 60...70 mm; oksien läpimitat on mitattu puun pituussuunnassa. Mitä voimakkaammin puu kapenee, sitä suurempia oksat ovat. Kärkkäisen tutkimuksen /16/ mukaan tiheässä kasvaneessa MT-kuusikossa puiden oksat eivät kasva läpimitaltaan 30 mm suuremmiksi. Oksien läpimita vaihtelee kuitenkin verraten vähän.

Männyn tyvitukin (6 m) paksuimman oksan koko on voimakkaasti riippuvainen vuosiluston keskimääräisestä leveydestä ytimen läheisyydessä, kuva 9 /3/. Laadukkainta puutavaraa saadaan riittävän tiheänä kasvaneesta hakkuin käsittelemättömästä metsästä. Liian ravinteikkaalla paikalla (pellot, OMT) kasvaneen tai kasvatetun mäntypuuston laatua ei hakkuilla voida parantaa /7/.

Kuva 9. Tyvitukin suurimman oksan koon riippuvuus vuosiluston keskimääräisestä paksuudesta ytimen lähimmässä ympäristössä. /3/

Figure 9. The size of the biggest knot as a function of the thickness of an annual ring. /3/



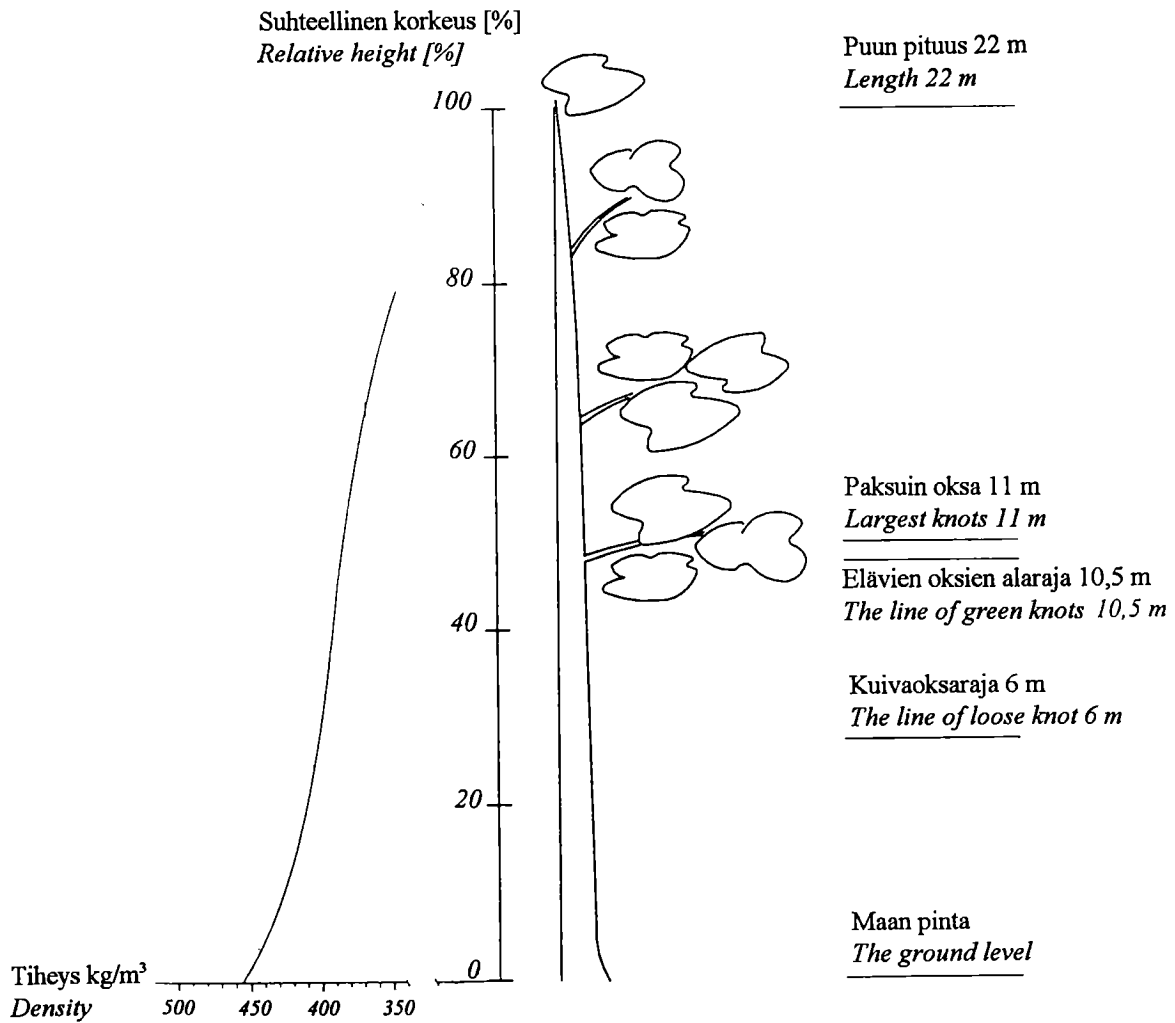
Käytännössä puun kasvupaikka ja etenkin alkuperä vaikuttavat enemmän oksien paksuuteen kuin mm. metsikön tiheys. Eri suuntiin kasvavien oksien läpimitat eivät ole toisistaan riippumattomia ja määräytyvät pelkästään valonsaannin mukaan. Esim. riveihin istutettaessa oksien paksuus määräytyi ennen kaikkea rivissä olevien puiden välisten etäisyyksien perusteella. Puukohtaisia oksaisuustunnuksia, kuten oksien lukumäärää ja pinta-alaa, pystyi Kärkkäinen kuusen ulkoista oksaisuutta koskevassa tutkimuksessaan /16/ ennustamaan tyydyttävästi rungon tilavuuden tai rinnankorkeusläpimitan avulla. Tutkimusaineisto edusti sellaista talousmetsää, joka oli saanut kasvaa lähes luonnontilaisena tai vain vähän harvennettuna. Oksan pituus ja paksuus korreloivat selvästi ja ilmansuunta vaikutti suhteellisesti enemmän oksan tyven paksuuteen, kuin oksan pituuteen. Eteläpuolen oksat olivat jonkin verran paksumpia kuin pohjoispuolen oksat ja niitä oli myös lukumääräisesti enemmän. Vaikka oksan paksuuskasvu vähenee ja myös loppuu aikaisemmin kuin sen pituuskasvu, voidaan elävän oksan pituuden avulla varsin tarkasti ennustaa sen tyvestä mitattu läpimita. Parhaiten oksien läpimitan ennustamiseen pituuden avulla soveltuivat puun keskiosan, 14...17 m, oksat. Oksien epäpyöreys ei Kärkkäisen aineistossa riippunut oksan koosta tai sijainnista. Läpimita pystysuoraan mitattuna oli keskimäärin 2,3 % suurempi kuin vaakasuoraan. Karkeasti kuvattuna oksien paksuus kasvaa ensin tyvestä ylöspäin, kunnes se jälleen pienenee vihreän latvuksen yläosassa oksien nuoruuden vuoksi. Siirtyminen kuolleiden oksien vallitsemasta latvuksen osasta vihreään latvukseen on vähittäinen. /16/

3.5 Yhteenveto kuusen ja männyn ominaisuuksista

Puuaineen lujuus on suoraan verrannollinen sen tiheyteen. Puuaineen tiheys kasvaa siirryttäessä puun ytimestä pintaan päin tai tyvestä latvaan päin. Kuusen puristuslujuuden suhde tiheyteen on paras, joten kuusi on painoonsa verrattuna lujin puulajimme. Kuusen ominaisuuksien on todettu vaihtelevan paljon vähemmän kuin männyn /6/, jolla esim. lujuuksien hajonta on suuri.

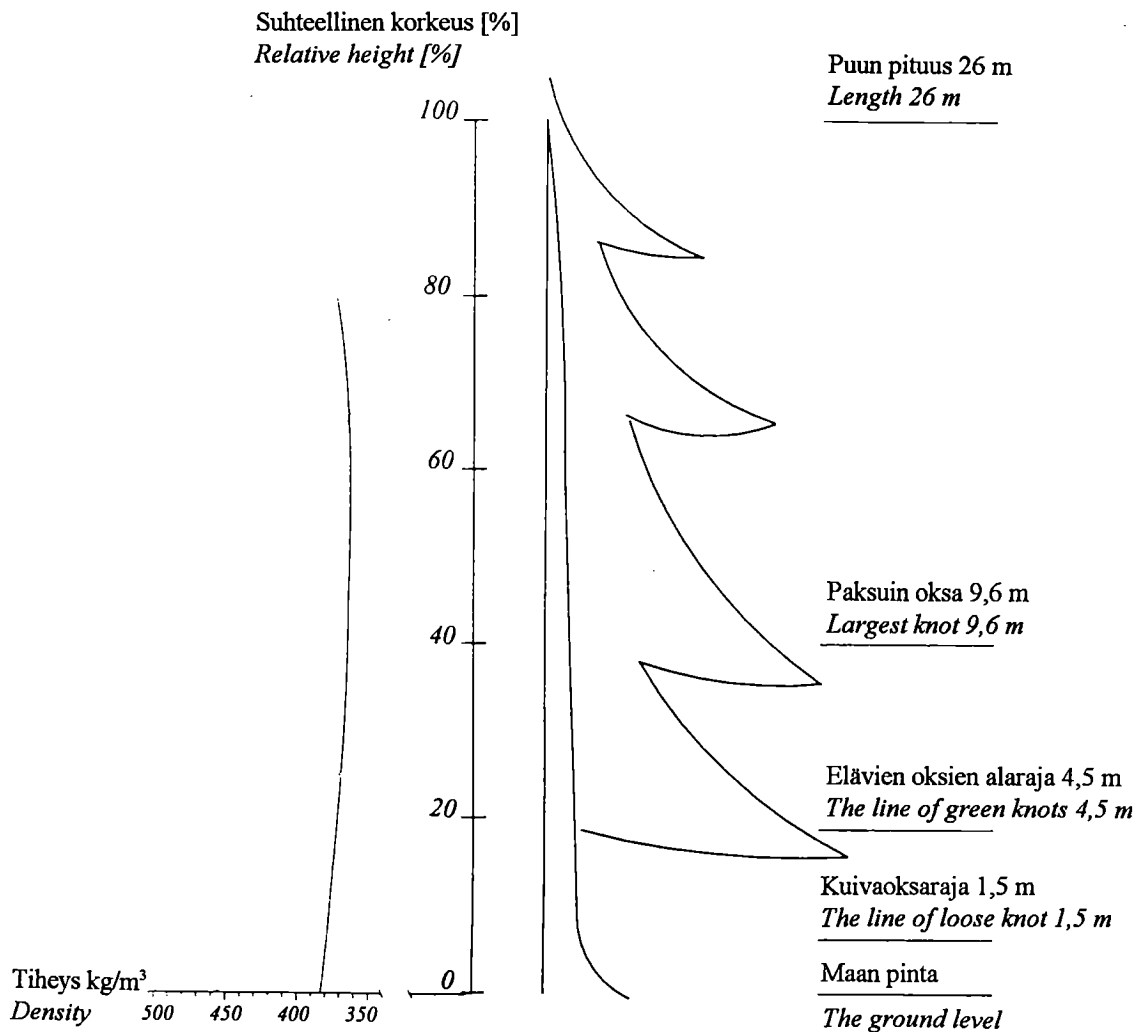
Suomessa on kolme mänty- ja kaksi kuusirotua. Ne eroavat toisistaan latvuksen muodon, elävien ja kuolleiden oksien rajakorkeuden sekä luontaisen karsiutumiskorkeuden perusteella. Kaikki ne tekijät, jotka lisäävät kasvunopeutta vaikuttavat tiheyttä alentavasti, mutta tiheyteen vaikuttaa myös puiden geneettinen vaihtelu.

Puiden oksikkuuteen vaikuttavat kasvutilan lisäksi muutkin tekijät, varsinkin männyssä puurodun vaikutus on selvä. Laatupuun kasvatuksessa hieno-oksaisten puurotujen suosiminen vähentää metsänhoidollisten toimenpiteiden aiheuttamia kustannuksia. /3/ Järeän männyn ominaisuuksia on esitetty kuvassa 10 ja kuusen ominaisuuksia kuvassa 11.



- Kun männyn halkaisija 35 cm ja pituus 22 m,
 - kuivaoksaraja on 6 m:n korkeudella (28 %),
 - elävien oksien alaraja 10,5 m:n korkeudella (48 %) ja
 - paksuin oksa hieman yli 11 m:n korkeudella (50 %).
- Suurimman oksan koko on halkaisijaltaan yli 35 cm:n puissa 60...70 mm.
- Kun tyvitukin (pituus 6 m) vuosiluston paksuus on alle 5 mm, niin oksien koko tukissa on alle 24 mm.
- Tiheys kasvaa ytimeistä pintaan päin eli tihein osa on ulkokehällä.
- Tiheys pienenee tyvestä latvaan päin, latvan tiheys on vain n. 80 % tyvipään tiheydestä.

Kuva 10. Kaavio järeän männyn ($d=35$ cm) oksavyöhykkeistä ja tiheyden vaihtelusta.
Figure 10. A scheme of the knot zones and the density variation in pine ($d=35$ cm).



- Kun kuusen halkaisija 35 cm ja pituus 24 m,
- kuivaoksaraja on 1,5 m:n korkeudella (6 %),
- elävien oksien alaraja 4,5 m:n korkeudella (19 %) ja
- paksuin oksa 9,6 m:n korkeudella (40 %), järeissä jopa alempana.
- Suurimman oksan koko on halkaisijaltaan yli 35 cm:n puissa 30...40 mm, tiheässä kasvaneessa kuusikossa alle 30 mm.
- Pääpuulajeistamme ohutoksisin.
- Tiheyden vaihtelu ytimen ja pinnan välillä vähäistä, pituussuunnassa kuusen tiheys vaihtelee vähemmän kuin männyn.
- Jos kuusitukissa havaitaan yksi sallittua suurempi oksa, on erittäin todennäköistä, että samassa tukissa on useampia sallittua oksaa suurempia oksia.

Kuva 11. Kaavio järeän kuusen ($d=35$ cm) oksavyöhykkeistä ja tiheyden vaihtelusta.

Figure 11. A scheme of the knot zones and the density variation in spruce ($d=35$ cm).

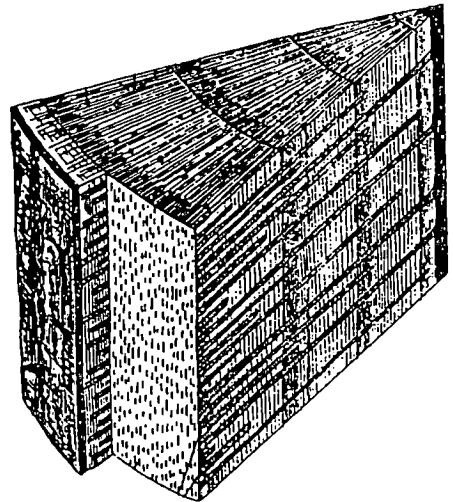
4 PUUAINEEN RAKENNE JA OMINAISUUDET

Puun rakennetta ja ominaisuuksia on tässä työssä käsitelty siltä osin kuin ne vaikuttavat puun ominaisuuksiin, lujuuteen tai käyttäytymiseen rakenteessa.

4.1 Puun rakenne

Puun kasvukausi alkaa keväällä ja päättyy loppukesällä /18/. Puu kasvaa samanaikaisesti sekä pituutta että paksuutta. Elokuun alkupuolella puu lopettaa paksuuskasvunsa ja loppuajan, maan jäätymiseen asti, se valmistaa vararavinteita seuraavan kasvukauden alkua varten varastoiden ne eri osiin runkoa /4/. Pituuskasvu tapahtuu varren kärjessä olevassa kärkikasvusolukossa, mutta suhteellisen lähellä kärkeä solut alkavat erilaistua. Sisimmäksi muodostuu ydin ja sen ulkopuolelle johtojännekehä. Kehä muodostaa myöhemmin puun uloimmaksi osaksi kambiumin eli jälsi-solukon, joka synnyttää sisään päin puuta, ulospäin nilaa. Kasvavan puun jälsi muodostaa ainoastaan pintapuuta /9/. Puun ikääntyessä sen vanhimmat solut kuolevat ja rungon keskelle muodostuu sydänpuu, joka sisältää huomattavasti enemmän hartsi- ja väriainetta kuin pintapuuta. Kasvavan puun osat näkyvät kuvassa 12.

- Ydin
- Varsinainen puuaine, jossa voidaan erottaa tummemman kesäpuun ja vaaleamman kevätpuun muodostamat vuosirenkaat, sekä useissa puulajeissa tummempi sydänpuu
- Jälsi, joka on uutta solukkoa muodostava kerros
- Nila, eli sisäkuori
- Ulkokuori, kaarna tai tuohi



Kuva 12. Kasvavan puun rakenne /18/
Figure 12. The structure of wood /18/.

Havupuiden puuaineessa on vain kahdenlaisia soluja, trakeideja eli vesisoluja ja parenkyymi- eli tylppysoluja /19/. Pintapuun ulompi osa on johtosoluvyöhyke, jossa trakeidit johtavat vettä ja ravinteita ylemmäs latvukseen. Sisempi osa on varastosoluvyöhyke, jossa ainoastaan elävät tylppysolut toimivat ja täysikasvuiset, kuolleet trakeidit muodostavat puun mekaanisen kestävyuden /9/. Soluseinämien tärkein aineosa on selluloosa. Selluloosamolekyylejä ja myös soluja yhteenliittävänä aineena, "liimana" toimii ligniini. Näiden lisäksi on puussa erilaisia hemiselluloosalajeja, ravintoaineita, tärkkelystä, sokeria ja rasvaa sekä hartseja, eteerisiä öljyjä, terpeenejä, parkkihappoja ja mineraaleja /19/.

4.1.1 Sydän- ja pintapuu

Havupuussa on selvä raja sydän- ja pintapuun välillä. Raja ei noudata vuosilustoja pituustai poikkileikkaussuunnassa, vaan saattaa ulottua usean eri vuosikasvun alueelle. Esim. oksien ympäristössä sydänpuu ulottuu lähemmäs pintaa. Männyssä sydän-pintapuurajan voi havaita väri- ja kosteuserosta, kuusessa lähinnä kosteuserosta. Tuoreessa puussa sydänpuun kosteus on n. 30...37 % ja pintapuun 120...180 % /20/.

Sydänpuussa puun rakenneosat ovat kuolleet. Kuusessa ja männyssä puuaineen muuntuminen sydänpuuksi muuttaa sydänpuun kemiallista koostumusta siten, että puun tiheys, lahonkestävyys sekä kaasujen ja nesteiden läpäisevyys eli permeabiliteetti muuttuvat. Tiheyden kasvaminen saattaa olla suuruusluokaltaan muutamia kymmeniä kg/m^3 /9/. Männyssä sydänpuuhun kerääntynyttä hartsia saattaa olla tyvessä jopa 25 %, kun 10 m:n korkeudessa sitä on enää vain 5...6 % (pintapuussa hartsipitoisuus on tasainen rungon eri korkeuksissa, 2...3 %) /4/. Sydänpuuta kehittyy vasta myöhemmällä iällä ja sen määrä riippuu /9/:

- iästä (sydänpuuosuus nousee jatkuvasti ja se kasvaa nopeammin kuin rungon tilavuus)
- puulajista (kuusessa sydänpuuosuus on suurempi kuin männyssä)
- kasvunopeudesta (nopeakasvuissa puussa osuus on suurempi jos ikä on sama, nopeakasvuissa puussa osuus on pienempi jos läpimitta on sama)
- sijainnista rungossa (männyssä maksimi on 20...30 % tyvestä ylöspäin, kuusessa noin rinnankorkeudella)
- maantieteellisestä sijainnista (Suomen oloissa sydänpuuosuus laskee pohjoisesta etelään päin, syynä on hidaskasvuisuus)

Valmiissa sahatavarassa sydän- ja pintapuun erilainen kuivuminen aiheuttaa lisäjännityksiä ja halkeilua. /21/

4.1.2 Vuosilusto

Kasvukauden aikana puu kasvattaa ympärilleen uuden vuosiluston, joka muodostuu vaaleasta kevätpuusta sekä tummemmasta kesäpuusta, joten puun rungon muodostavat päällekkäisinä, kartiomaisina kerroksina sijaitsevat vuosilustot. Vuosiluston puuaineksen muodostaa jälsi ja se on pääasiassa trakeideja. Vaaleampi kevätpuu syntyy kasvukauden alussa, sen solut ovat suurionteloisempia ja ohutseinäisempiä kuin kesäpuun. Tumma kesäpuu on kasvanut hitaammin, se on tiiviimpää ja kovempaa. Väriero kevät- ja kesäpuun välillä johtuu soluseinämien paksuseroista. Vuosiluston paksuus riippuu puulajista, puuyksilöstä ja ympäristöolosuhteista, kuten lämpösummasta ja sademäärästä /9/. Männyssä vuosiluston paksuus on 0,1...10 mm ja kuusessa 0,2...12 mm /22/. Ohuimmillaan se on yleensä isojen puiden uloimmissa kerroksissa.

Männyssä kesäpuun tiheys on 810...920 kg/m^3 ja kevätpuun tiheys 300...370 kg/m^3 /9/. Kesäpuun tiheys vaihtelee enemmän kuin kevätpuun. Kuusen ja eräiden muiden havupuiden kesäpuun absoluuttinen määrä on suunnilleen samansuuruinen vuodesta toiseen luston kokonaisvahvuudesta riippumatta. Yleisesti oletetaan että havupuiden kasvunopeuden

hidastuessa kesäpuun osuus (kesäpuuprosentti) kasvaa aivan äärimmäisiä olosuhteita lukuunottamatta. Kesäpuuprosentti on suurimmillaan vuosiluston paksuuden ollessa 1,0...1,5 mm ja se alenee vuosiluston ohetessa tai paksuuntuessa. Kesäpuuprosentti ja kesäpuun absoluuttinen määrä lisääntyvät ytimestä pintaan päin ja yleensä ovat suurimmillaan rungon tyvellä. Vuosiluston puuaineen keskitiheyttä on ennustettu pelkästään kesäpuun osuuden avulla ja sen perusteella arvioitu puun lujuutta. /9/

4.1.3 Nuorpuu ja ydin

Ydin on parenkymisolukkoa, jolla ei ole mekaanista lujuutta. Ydin näkyy rungon poikkileikkauksessa muutaman millin vahvuisena pisteenä ja sen läpimitta kasvaa tyvestä latvaan päin. /9/

Nuorpuu on ytimen lähellä olevaa puuainetta. Nuorpuuvyöhykkeen vahvuus on 2...30 vuosilustoa ja sen läpimitta pienenee latvaan päin mentäessä. Kuudessa aleneminen on selvää. Nuorpuun tiheys on pienempi kuin normaalipuun, joten sen lujuus on heikompi. Lisäksi sen kutistumis- ja turpoamisominaisuudet poikkeavat normaalipuusta. Ytimen ympärillä oleva, noin 2 cm:n läpimittainen puun osa sisältää valtaosan hallavaurioista. On mahdollista että tämän nuorpuuhun kuuluvan puunosan halkeamiset kuivauksessa ym. heikot ominaisuudet heijastavat hallavaurioiden aiheuttaman heikon solukon lisääntymistä. Hallavaurioille on tyypillistä trakeidien puutteellinen puutuminen ja muodon epäsäännöllisyys sekä puutylpyn lisääntyminen. Sahatavaraan nuorpuu muodostaa heikon vyöhykkeen. /9/

4.1.4 Reaktiopuu

Reaktiopuu on erikoisolukkoa, jota syntyy taivutettuun runkoon ja oksien alapuolelle. Sitä esiintyy puissa, jotka kasvavat tuulisilla paikoilla tai vinossa. Havupuissa se on puristuspuuta eli lylä. Lyläpuuta syntyy aina siihen kohtaan runkoa, jossa puristusjännitys on normaalia suurempi. Lylän puoleiset vuosilustot ovat paksumpia kuin normaalipuun, joten puun runko muodostuu epäkeskeiseksi. Sen kosteusmuodonmuutokset poikkeavat suuresti normaalipuusta. Tangentin ja säteen suuntaan lyläpuu kutistuu huomattavasti vähemmän ja syiden suuntaan huomattavasti enemmän kuin normaalipuu /23/. Pituussuuntainen muodonmuutos on 7...8 %, tangentin ja säteen suuntainen 3...4 % /9/. Lylän käyttäytyminen eroaa normaalipuusta siten että kuivuessaan se halkeilee, kieroutuu ja kutistuu voimakkaammin ja paljon epäsäännöllisemmin kuin normaali puuaine /23/. Reaktiopuu on tiheämpää kuin normaalipuu. Kuudessa lyläpuun tiheys on noin 160 % verrattuna normaalipuuhun /9/. Hajahavainnot viittaavat siihen, että viljelymännikoissä reaktiopuun osuus on moninkertainen luonnonmetsiin verrattuna. /24/

Kuivattavan sahatavaran muodonvääristymiset ovat sitä voimakkaammat, mitä enemmän kappale sisältää reaktiopuuta ja jatkossakin kappale reagoi ympäristön kosteuden muutoksiin voimakkaammin kuin pelkästään normaalia puuta oleva kappale. /23/

4.2 Puun fysikaaliset ominaisuudet

4.2.1 Tiheys

Kuusen ilmakeuva tiheys ρ_{15} on 460 kg/m^3 ja männyn 490 kg/m^3 /25/. Tiheys vaihtelee keväät- ja kesäpuuosuuksien mukaan. Oksapuun ja runkopuun välinen tiheysero on kuusessa selvästi suurempi kuin männyssä. Nokelainen /26/ on mitannut oksapuun tiheydeksi kuusessa 720 kg/m^3 ja männyssä 590 kg/m^3 .

4.2.2 Kosteus

Puun vesipitoisuudella tarkoitetaan yleensä veden massan ja vedettömän puun massan suhdetta. Kosteus ilmaistaan usein kosteusprosenttina u [%]

$$u = \frac{m_v}{m_o} = \frac{(m_m - m_o)}{m_o} \times 100 \quad (1)$$

- m_v = veden massa
 m_m = kostean puun massa
 m_o = vedettömän puun massa

Puun on hygroskooppinen aine eli se pystyy sitomaan sitä ympäröivän kaasuseoksen esim. ilman vesihöyryä. Puu pyrkii aina asettumaan ympäröivän ilman kosteutta vastaavaan tasapainokosteuteen. Eri puulajien puunsiiden kyllästymispiste P_{sk} on 25...30 % /19/, suomalaisissa havupuissa se on n. 27 %. Lämpötilan kohotessa P_{sk} alenee n. 1 % / 10 °C /4/. Ilman suhteellisen kosteuden ollessa 100 %, puun kosteus asettuu kyseistä lämpötilaa vastaavan P_{sk} :n tasolle.

Puun lujuusominaisuudet alkavat parantua ns. rajakosteuden jälkeen, joka suomalaisissa havupuissa on n. 24 % /26/. Kosteusalueella 12...24 % puun lujuus riippuu varsin suoraviivaisesti kosteudesta /27/. Kosteusreduktiosta kokeen aikainen kosteusprosentti määritetään ja lujuusarvot muunnetaan sitten samaa, sovittua kosteusprosenttia vastaaviksi. /6/

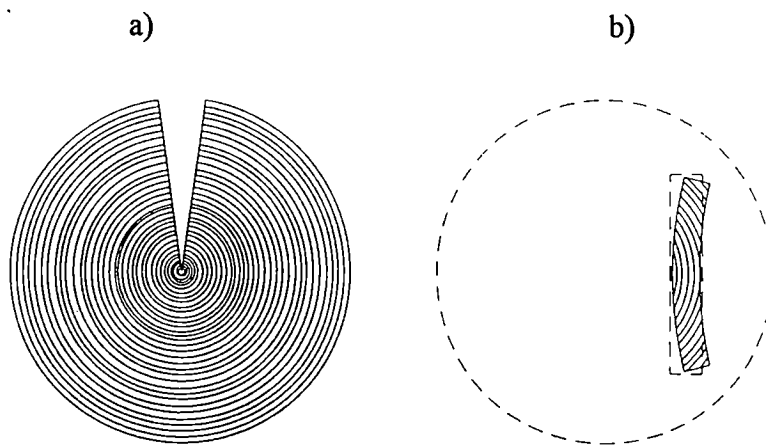
4.2.3 Kosteusmuodonmuutokset

Normaalioloissa puu sisältää aina vettä. Osa vedestä on puun soluonteloissa irtaimena ja osa soluseinämiin sitoutuneena. Puun kuivuessa haihtuu ensin soluonteloissa oleva vapaa vesi ja vasta sen jälkeen soluseinämiin sitoutunut vesi. Puunsiiden kyllästymispisteessä vapaa vesi on haihtunut, mutta soluseinämät sisältävät vielä maksimimäärän vettä. Vapaan veden lisääntyminen tai vähentyminen ei aiheuta puussa muodonmuutoksia. Kosteuden laskiessa alle P_{sk} :n aiheuttaa soluseinämistä poistuva vesi puun kutistumista /18/.

Puun muodonmuutokset, kuten muutkin ominaisuudet, ovat anisotrooppisia. Puu kutistuu ja paisuu likimain suoraviivaisesti puun kosteussuhteen ollessa 6...20 %. Tuoreesta täysin kuivaksi kotimainen havupuu kutistuu pituussuuntaan 0,1...0,2 %, säteen suuntaan n. 4 % ja tangentin suuntaan n. 8 %. Tilavuuskutistuminen on n. 12 %. Tiheyden kasvaessa tilavuus-kutistuma kasvaa, samoin säteen ja tangentinsuuntainen kutistuma. Sitä vastoin pituuden suuntainen kutistuma vähenee tiheyden kasvaessa /9/.

Havupuiden kutistumisen anisotrooppisuus voidaan selittää kevät- ja kesäpuun kutistumien erilaisuudella. Kesäpuu on tiheämpää ja myös kutistuu enemmän kuin kevätpuu. Tangentin suunnassa vuosiluston kutistuminen määräytyy lähinnä kesäpuun perusteella, koska heikko kevätpuu ei pysty vastustamaan kesäpuun aiheuttamaa kutistumista. Sen sijaan säteen suunnassa kutistuminen on kevät- ja kesäpuun kutistumisen summa ja siis suhteellisesti pienempi kuin tangentin suunnassa. Kutistumisen ja paisumisen anisotropialla on monissa puun käyttömuodoissa huomattava merkitys.

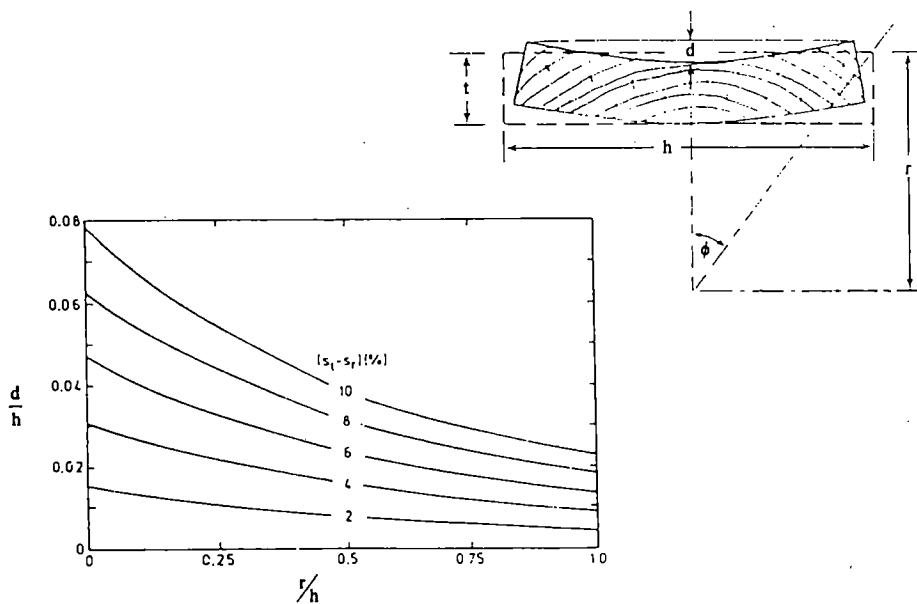
Pyöreä puu halkeilee helposti kuivuessaan, sillä tangentin suuntainen kutistuminen on lähes kaksi kertaa suurempi kuin säteen suuntainen. Pyöreästä puusta leikattuun kiekkoon syntyy v-kirjaimen muotoinen halkeama, kuva 13a. Puusta tavanomaisella tavalla sahattu lauta käyristyy kuvan 13b mukaisesti kupera puoli on ytimeen päin. Laudan koveruus on sitä suurempi, mitä lähempää ydintä lauta on sahattu ja mitä suurempi ero säteen ja tangentin suuntaisella kutistumalla on. Poikkileikkauksen käyristyminen on suurimmillaan silloin kun toinen sahauspinta kulkee ytimen kautta /9/. Skaarin mukaan /28/ koveruus d voidaan laskea yhtälöstä (2).



Kuva 13. Pyöreän puun ja laudan kuivumismuodonmuutokset
Figure 13. The moisture deformations of the roundwood and a board.

$$\frac{d}{w} = 0,005(S_t - S_r) \tan\left(\frac{w}{2r}\right) \quad (2)$$

- d = koveruus [mm]
- h = poikkileikkauksen korkeus [mm]
- r = poikkileikkauksen pintalappen etäisyys ytimestä [mm]
- S_t = tangentin suuntainen kutistuminen [%]
- S_r = säteen suuntainen kutistuminen [%]

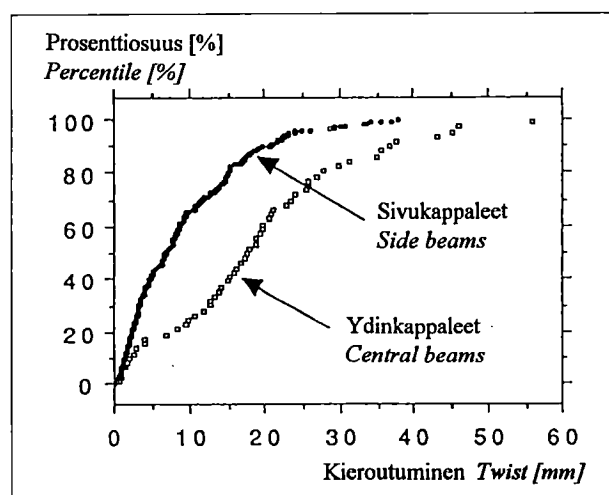


Kuva 14. Kuivuvan poikkileikkauksen koveruus sekä tangentin ja säteen suuntaisen kutistuman välisen eron vaikutus. /28/

Figure 14. The concavity of a drying board /28/.

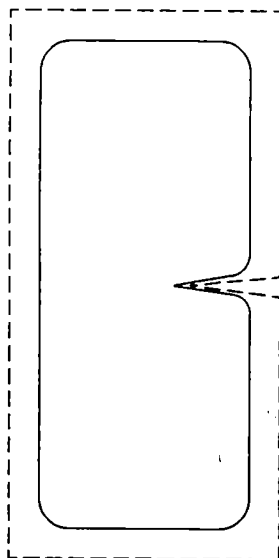
Viitaniemi on tutkimuksessaan /30/ todennut että kuusen kuivumisen yhteydessä tapahtuviin muodonmuutoksiin vaikuttaa eniten kappaleen sahausasema rungossa. Mitä lähempää ydintä kappale on sahattu, sitä enemmän se kieroutuu. Kappaleet, joissa puun ydin on jäänyt kappaleen sisään, kieroutuvat eli vääntyvät pituusakselin ympäri eniten. Tutkimuksessa todettiin kieroutumisen olevan kääntäen verrannollinen ytimestä lasketun etäisyyden neliöjuureen. Vinosyisyyden havaittiin myös merkittävästi vaikuttavan kappaleen kieroutumiseen. Pyrittäessä ennustamaan yksittäisen kappaleen kieroutumistaipumusta on tarkasteltava myös syynsuuntaa kappaleen eri puolilla. Kappaleen kieroutuminen oli suoraan verrannollinen pinta- ja sydänlappen syykulmien väliseen erotukseen. Vääristymiseen kappaleen sahausasemalla tai syykulmalta ei todettu olevan vaikutusta.

Perstoper, Klinger ja Johansson /29/ ovat tutkimuksessaan todenneet että kuusen ytimen sisältävä lankku kieroutuu enemmän kuin ytimen vierestä sahattu. Vääristymiseen ei sahausasemalla todettu olevan vaikutusta, sen sijaan nopeakasvuisten lankun vääristymät olivat huomattavasti suuremmat kuin hidaskasvuisten. Kasvunopeudella ei havaittu olevan vaikutusta kappaleen kieroutumiseen. Kuvasta 15 nähdään että ydinkeskeinen lankku kieroutuu noin kaksi kertaa voimakkaammin kuin ytimen vierestä sahattu.



Kuva 15. Kuusen kieroutuminen (twist), kun mittausväli on 5 metriä ja poikkileikkauksen koko $70 \times 290 \text{ mm}^2$. Ydinkeskeisten (central beam) ja ytimen vierestä sahattujen (side beam) lankkujen käyttäytyminen eroaa selvästi toisistaan. /29/

Figure 15. The twist of spruce beams, when the measuring length 5 m and the cross section is $70 \times 290 \text{ mm}^2$. /29/



Kuva 16. Halkeaman vaikutus massiivipuun hiiltymiseen.

Figure 16. The effect of a crack on charring.

4.3 Puun paloturvallisuus

Massiivien puun kantavuus säilyy pitkään palossakin, sillä palaavan puun pintaan muodostuva hiilikerros hidastaa sisäosien lämpenemistä ja samalla puun palamista. Massiivipuun hiiltymisnopeus on vakio n. 0,8 mm/min, ja poikkileikkausta kasvattamalla rakenteet voidaan mitoittaa kestämään vaadittu palonkestoaika. Halkeilun vaikutus puun palamiseen on melko vähäinen, kuva 16. Puun palaessa halkeaman reunat pyöristyvät ja halkeaman merkitys esim. taivutusalkin lujuuteen muiden palotilanteissa esiintyvien ilmiöiden yhteydessä on vähäinen.

5 PUUN LUJUUS- JA KIMMO-OMINAISUUDET

5.1 Yleistä

Puulla on hyvät lujuusominaisuudet painoon verrattuna. Ulkoiset olosuhteet, kuten kosteus tai lämpötila sekä aika vaikuttavat ratkaisevasti puun lujuuteen. Puun lujuusominaisuudet alkavat parantua ns. rajakosteuden jälkeen, joka suomalaisissa havupuissa on n. 24 % /26/ ja paraneminen jatkuu aina n. 5 %:n kosteuteen saakka.

Rakenteiden mitoituksen perustana on lujuuden ominaisarvo, arvo jota heikompia yksilöitä arvioidaan olevan 5 %. Ominaisarvo on paljon alempi kuin keskimääräinen lujuus, sillä sen arvoon vaikuttavat sekä otoksen koko että hajonta. Ominaisarvon riippuvuus kosteudesta voi olla erilainen kuin keskimääräisen lujuuden. /31/

Eurooppalaisen testistandardin mukaan taivutuskokeessa kappaleen suurin virhe asetetaan kahden kolmannespisteissä sijaitsevan pistekuorman väliselle alueelle. Koe voidaan tehdä vain kappaleista, jotka ovat määrittelyn mukaisia ja tällöin jopa kaksi kolmasosaa normaalisahatavaraa edustavasta joukosta jää testaamatta. Kanadalaisen ja australialaisen koemenetelmien mukaan suurin vika sijoitetaan satunnaisesti sekä vetovyöhykkeelle että pituussuunnassa. USA:n koemenetelmien mukaan luokan määräävä vika sijoitetaan jänneväliin. Joissakin tapauksissa kosmeettiset lajittelusäännöt sijoittavat kolmasosan kappaleista johonkin lujuusluokkaan. Tämä vaikeuttaa tulosten tulkintaa ja puun ominaislujuuden sekä sen rakenteellisen merkityksen määrittämistä. /32/

Puun lujuusominaisuudet vaihtelevat puun eri suunnissa. Virheettömän puun puristuslujuus on noin puolet vetolujuudesta, sen sijaan taivutuslujuus on lähes yhtä suuri kuin vetolujuus. Taivutetussa rakenteessa jännityksen kasvaessa lähelle puristuslujuuden arvoa, puristuspuolella tapahtuu syiden nurjahtamista ja neutraaliakseli siirtyy vetopinnan suun-

taan. Taivutusmurto saavutetaan, kun puun vetopinnassa jännitys ylittää vetolujuuden ja taivutettu rakenne murtuu. Puristuksessa puu käyttäytyy kuten sitkeä materiaali, muuta vedossa se on lähinnä hauras aine. Erityisesti märkä kuusi käyttäytyy taivutuksessa sitkeän materiaalin tavoin. /25/

Pienistä koekappaleista mitattuja lujuusarvoja ei voida sellaisenaan käyttää normaalikoisen puutavaran arvoina. /32/ Kun puun lujuusominaisuuksia määritetään pienistä virheettömistä koekappaleista, saadaan paljon suuremmat lujuusarvot kuin täysimittaisia koekappaleita käytettäessä. Ilmiötä selitetään Weibullin teorian mukaan todennäköisyydellä: mitä suurempi kappale on, sitä suurempi on todennäköisyys että se sisältää murtuman alkuun panevan heikon kohdan. Isojen koekappaleiden lujuutta pienentävät niissä satunnaisesti esiintyvät virheet, mm. oksat ja vinosyisyys. Vikojen vaikutusta voidaan rajoittaa lajittelemalla sahatavara eri luokkiin vikojen suuruuden perusteella. Vähemmän ja pienempiä vikoja sisältävän sahatavaran suunnitteluarvot voivat olla suurempia. Virheettömien koekappaleiden lujuus riippuu pääasiassa puun tiheydestä.

5.2 Kosteuden vaikutus lujuuteen

Puun kosteuspitoisuuden muutos vaikuttaa puristuslujuuteen huomattavasti enemmän kuin vetolujuuteen. Madsenin kanadalaisella sahatavaralla suorittamissa taivutuskokeissa ominaislujuuden riippuvuus kosteudesta vaihteli. Lujien taivutuskoe-kappaleiden kokeissa näkyy puristuslujuuden voimakas riippuvuus kosteudesta, mutta tavanomaisen sahatavaran ominaisarvon määrää alhainen vetolujuus, joka on melkein riippumaton kosteudesta /31/. Lujemmilla kappaleilla taivutuslujuus kasvaa kun kosteuspitoisuus laskee. Kuva 17 esittää virheettömän suomalaisen männyn lujuuden ja kosteuden välistä riippuvuutta.

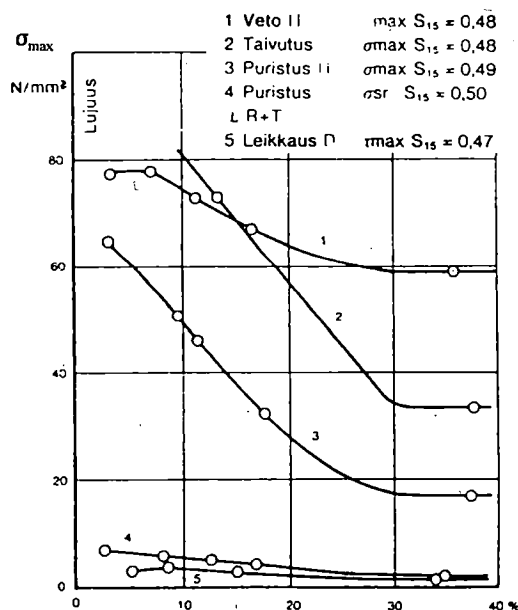
Kuva 17. Virheettömän männyn lujuuden keskiarvon riippuvuus kosteudesta. /25/

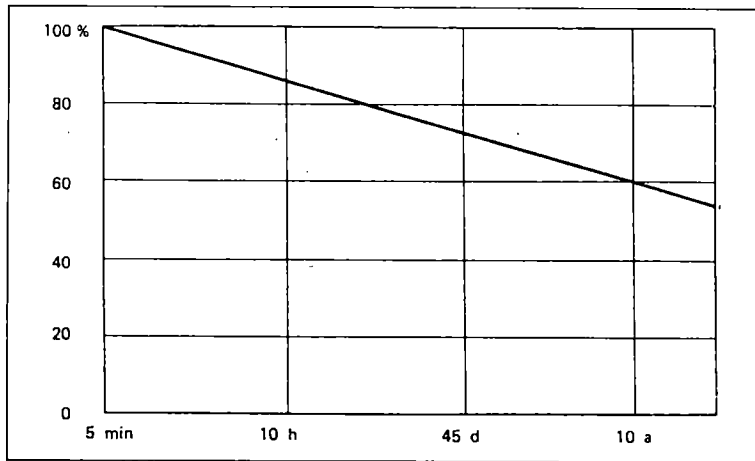
Figure 17. The strength of perfect wood (pine) as a function of the moisture content. /25/

5.3 Kuormitusajan vaikutus lujuuteen

5.3.1 Kuormitusaika

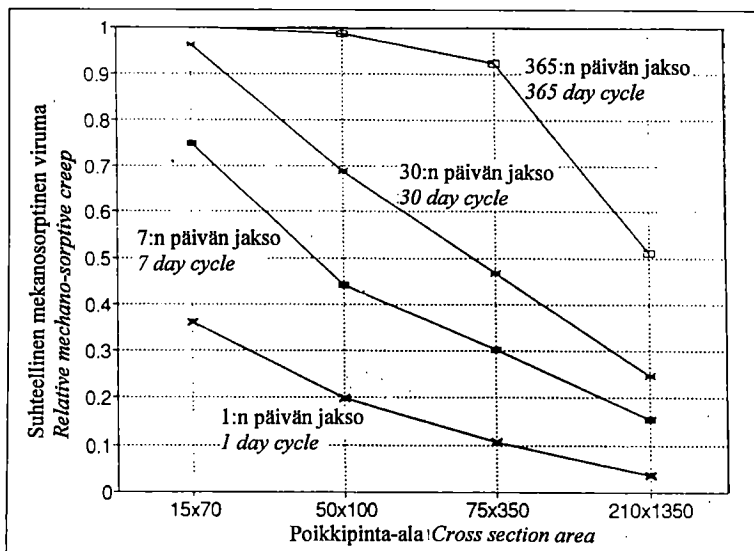
Puu kestää lyhytaikaista kuormitusta enemmän kuin pitkäaikaista. Lujuuden ja kuormitusajan välinen yhteys on logaritminen, kuva 18. Puu kestää tasaisessa kosteudessa 10 vuotta kuormitusta, joka on noin 60 % lyhytaikaisesta murto-kuormasta. Kosteusvaihtelut pienentävät puun pitkäaikaislujuutta.





Kuva 18. Puun pitkäaikaislujuus.

Figure 18. The stress ratio (%) versus logarithmic time to failure.



Kuva 19. Eri poikkileikkauksille (cross section area) lasketut suhteellisen mekano-sorptisen viruman arvot (relative mechano-sorptive creep) eri pituisten kosteusyökkien vaikutuksesta, kun ilman suhteellinen kosteus vaihtelee sinimuotoisesti RH 30...90 %. /33/

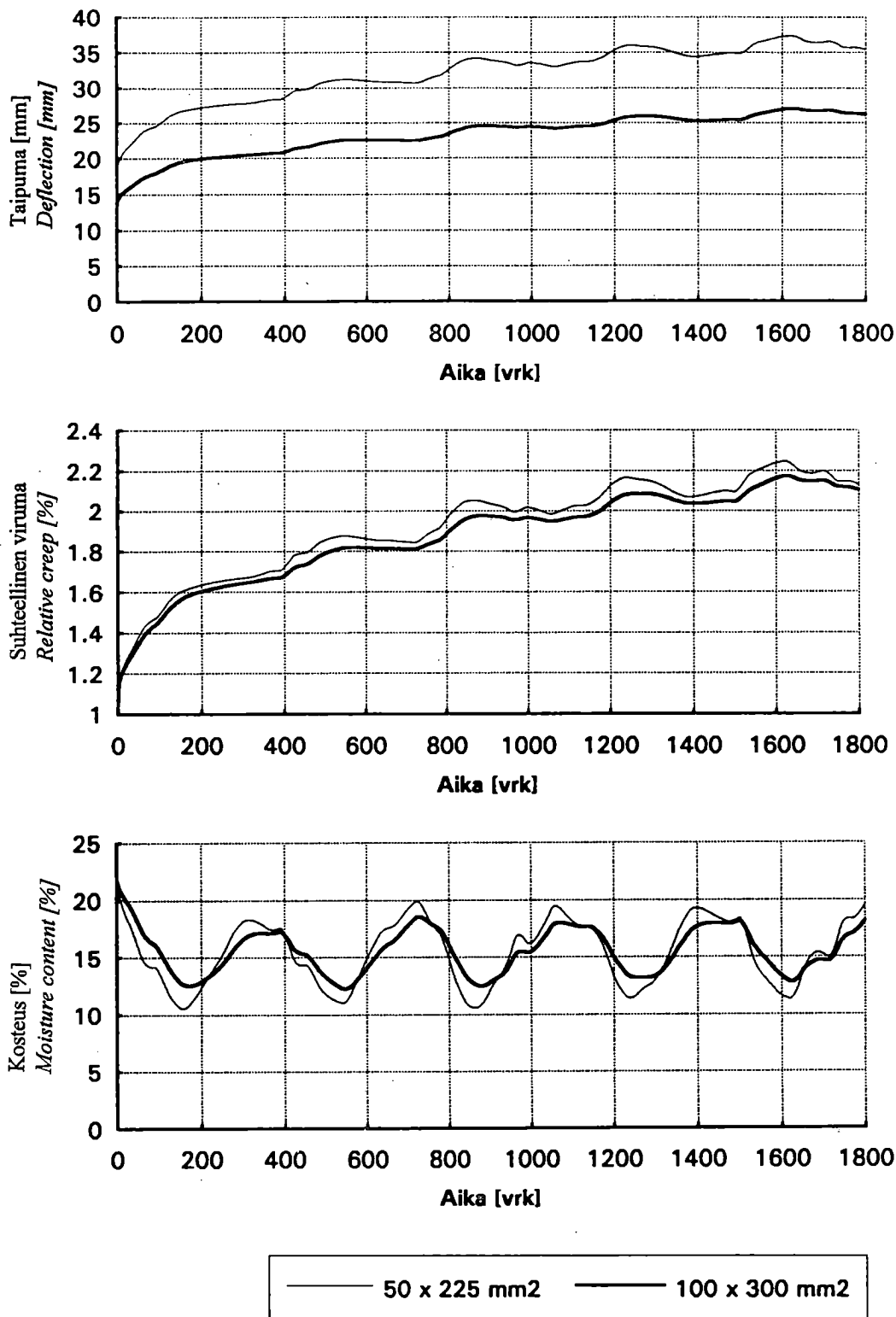
Figure 19. Computed mechano-sorptive creep for wood members of different size /33/.

tai ilmaston vaihteluita ei huomioida, vaikka ne huomattavasti lisäävät virumaa /32/.

Toratti on todennut /33/ että esim. tyypilliseen liimapuurakenteeseen syntyy virumasta 50 vuoden aikana todellisissa ulkoilma- ja kuormitusolosuhteissa pitkäaikaistaipuma, joka on noin kaksinkertainen alkutaipumaan nähden. Kuvassa 20 on esitetty kahdelle eri poikkileikkaukselle luonnonolosuhteita vastaavan ilman suhteellisen kosteuden muutoksien vaikutus virumaan ja poikkileikkausten keskimääräiset kosteudet vastaavana aikana, kun poikkileikkaukseen vaikuttaa 10 MPa:n taivutusjännitys. Kuvasta nähdään että normaalin sahatavaran taipuma on 35 % suurempi kuin järeän poikkileikkauksen. Sen sijaan poikkileikkauksen koko ei merkittävästi vaikuta suhteelliseen virumaan eli viruman ja kimmoisan taipuman väliseen suhteeseen. Poikkileikkauksen keskikosteus vaihtelee järeässä poikkileikkauksessa vähemmän kuin sahatavarassa ja muutokset tapahtuvat hitaammin.

5.3.2 Viruminen

Puurakenteen viruminen riippuu ajasta, rakenteen poikkileikkauksesta, ympäristöolosuhteista ja kuormitushistoriasta. Muuttumattomissa ympäristöolosuhteissa viruma on riippumaton kosteudesta ja sen suuruuden määrää pääasiassa pysyvä kuorma. Mekanosorptinen viruma riippuu kosteusmuutoksista ja se ei eroa tavallisesta virumasta jos kosteusvaihtelusyklejä on vain muutama. Kokeellisesti on kuitenkin todettu että syklien lukumäärän kasvaessa mekano-sorptinen viruma kasvaa. Kuvassa 19 on havainnollistettu poikkileikkauksen koon vaikutusta mekano-sorptiseen virumaan kosteusvaihtelusykkien lukumäärien muuttuessa. Kokovaikutus on merkittävä ulko-olosuhteissa, joissa kosteus vaihtelee. Monissa puurakenteen mitoitusnormeissa kosteuspitöisuuden



Kuva 20. Luonnonolosuhteita vastaavan ilman suhteellisen kosteuden muutosten vaikutus virumaan, suhteelliseen virumaan ja poikkileikkauksen keskikosteuteen poikkileikkausten ollessa 50×225 mm² sekä 100×300 mm², kun vakiokuorman aiheuttama taivutusjännitys on 10 MPa. /33/

Figure 20. The effect of the air humidity variation to creep, relative creep and the average moisture content, cross sections 50×225 mm² and 100×300 mm², when the bending stress is 10 MPa. /33/.

5.4 Viat ja niiden vaikutus puun lujuteen

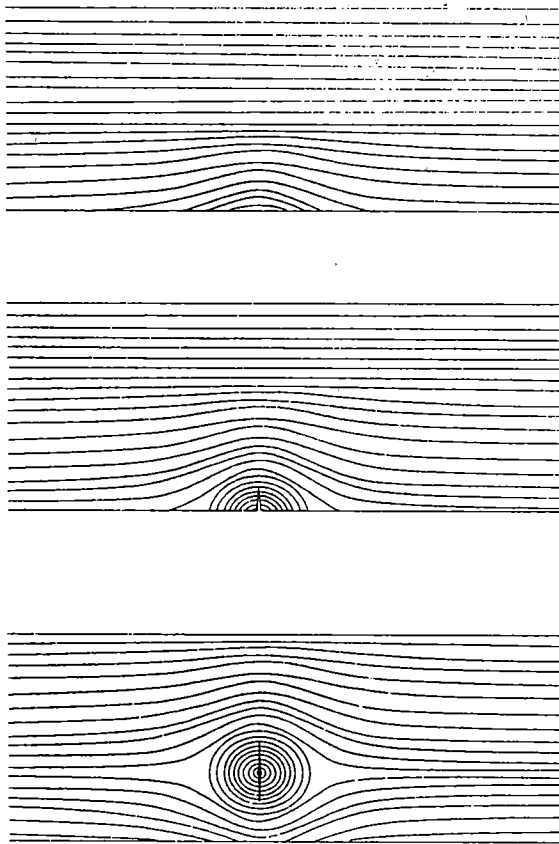
5.4.1 Vino- ja kierresyisyys

Vinosyisyydellä tarkoitetaan puun syiden suunnan poikkeamista puun pituussuunnasta. Pituussuuntainen kuormitus aiheuttaa vinosyisessä kohdassa syiden suuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa kuormituskomponentin. Koska puun veto- tai puristuslujuus on tässä suunnassa vain murto-osa syiden suuntaisesta, muodostaa vinosyisyys sahatavaraan heikon kohdan. Suoran puutavaran sahaaminen lengosta tai huomattavan epäpyöreästä tukista aiheuttaa muutoin suorien syiden katkeamisen ja vinosyisyyttä puutavaraan /34/. Vinosyisyys heikentää huomattavasti mekaanisesti muotoillun puun lujutta. Tämä johtuu puun työstön yhteydessä tapahtuneesta syiden katkeamisesta. Pylväässäkin esiintyy vinosyisyyttä ja kierteisyyttä, mutta pylvään pinnan sorvauksen vähäisen asteen vuoksi syiden katkeamista tapahtuu erittäin vähän ja lujouden aleneminen vinosyisyyden johdosta jää pieneksi. /35/

Kierresyisessä puussa puun syyt kiertävät spiraalimaisesti puun pituusakselin ympäri. Kierresyisyys havaitaan kuivumis- ja kutistumishalkeamien perusteella, jotka pyöreässä puutavarassa etenevät spiraalimaisesti ja sahatavarassa vinossa. Kierteisyys vaikuttaa pyöreän puun kestävyteen hyvin vähän, sillä syyt ovat jatkuvia. Suorakaiteen muotoisessa puussa monet syyt ovat poikki vinottain ja lujuus on pienempi kuin suorasyisellä puulla. Kierresyisellä puulla kosteuspitoisuuden muutos aiheuttaa kiertymistä spiraalin suuntaan. /34/

5.4.2 Oksat

Oksat ovat merkittävin sahatavaran lujutta heikentävä tekijä. Vaikka oksan puuaine on tiheämpää kuin ympäröivän puun, on kuormitussuunta yleensä oksan syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Puun vetolujuus syyn suuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa on vain n. 5...10 % ja puristuslujuus n. 10 % verrattuna syyn suuntaisiin arvoihin. Tämän vuoksi oksan puuaineen suuremmasta tiheydestä huolimatta sen lujuus ympäröivään puuainekseen verrattuna on heikompi. Kuivuessaan terve oksa tiheydensä ja syyn suuntansa vuoksi kutistuu enemmän kuin ympäröivä puuaine ja halkeaa. Kuollut oksa yleensä lisäksi irttaa ympäröivästä puuaineesta. Molemmissa tapauksissa oksalla ei ole enää vetolujuutta sahatavaran pituussuunnassa. Oksien taivutuslujuutta heikentävän vaikutuksen arviointiin on parhaiten onnistunut reikäanalogian avulla /26/. Reikäanalogiaa sovellettaessa oksa oletetaan reiäksi ja jännitykset lasketaan jäljelle jääneelle nettopoikkileikkaukselle. Menetelmässä ei oteta huomioon oksien ympärillä olevaa syykuviota ja sen vaikutusta. Reiän ympäristöön syntyvät jännityshuiput jätetään usein myös huomioitta. Reikäanalogia ei sovellu oksan vaikutuksen arvioimiseen puhtaassa puristuksessa tai vedossa. Puristuksessa oksan vaikutusta on edullisinta mallittaa suhteellisen oksapinta-alan avulla. Vedossa oksan vaikutus riippuu suhteellisesta oksapinta-alasta ja sijainnista poikkileikkauksessa. Oksan sijainti voidaan ottaa huomioon parabolisen mallin avulla ja se on epäedullisin, kun oksa sivuaa syrjää. /26/



Kuva 21. Oksan ja sitä ympäröivän puun vinosyisyyden vaikutus sahatavaran vinosyisyyteen.

Figure 21. The fibre inclination caused by a knot.

Oksa aiheuttaa lisäksi syiden poikkeamisen pituussuunnasta ja oksan ympärillä esiintyy aina vinosyisyyttä. Sahauksessa oksa aiheuttaa valmiiseen sahatavaraan vinosyisyyttä, joka heikentää lujuutta, kuva 21.

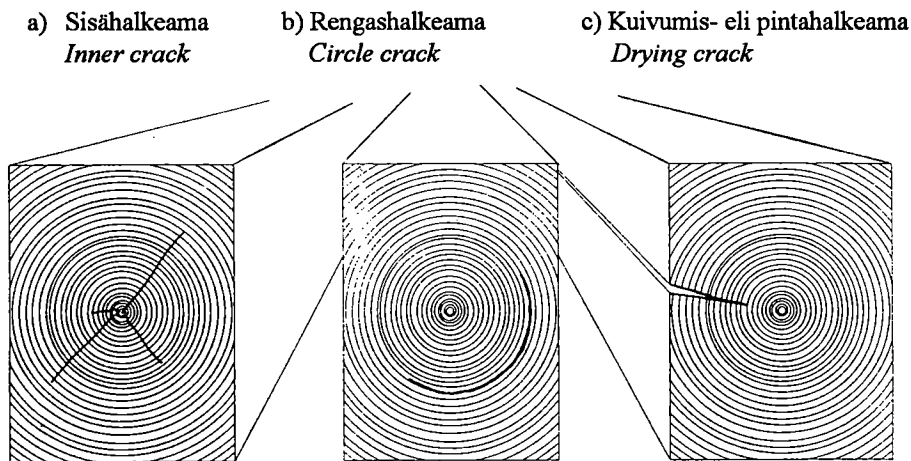
5.4.3 Reaktiopuu

Tuoreen reaktiopuun mekaaninen lujuus on hyvä. Kuivuminen vaikuttaa lylyyn epäedullisesti, erityisesti vetolujuus syiden suunnassa on normaalipuuta heikompi. Lylyn suhteellinen lujuuden aleneminen kuivumisen seurauksena johtuu lylypuun voimakkaasta pituuden suuntaisesta kutistumisesta, joka aiheuttaa mikroskooppisia murtumia. Kuitenkin oksat ja vinosyisyys näyttävät vaikuttavan olennaisesti enemmän puutavarakappaleen lujuuteen kuin reaktiopuu. /24/

5.4.4 Halkeamat

Halkeamat heikentävät erityisesti puun leikkauslujuutta, joten niiden syntymistä esim. kuivauksen aikana yritetään rajoittaa. Halkeamia syntyy kuitenkin myös kasvavaan puuhun /36/. Rengashalkeama on vuosirenkaiden suuntainen ja sen saattaa aiheuttaa esim. tuulen taivutus tai puun kaato, jonka vaikutuksesta vuosilustot repeytyvät irti toisistaan. Koska halkeama ilmestyy vanhojen puiden sydänpuuhun, jossa pihka on jo kovettunut, ei repeytymä täyty pihkalla vaan jää avonaiseksi. Säteittäiset, ytimestä lähtevät sydänhalkeamat ovat tavallisia vanhoissa puissa ja sellaisissa puulajeissa, joilla on selvä sydänpuumuodostuma. Ne muodostavat halkeamia puun tyveen ja voivat ulottua korkealle runkoon. Kuivumisen aiheuttamia sydänhalkeamat eivät ole, vaikka sydänpuu on kuivempaa kuin pintapu, sillä sydänpuu ei kuivu kasvavassa puussa P_{sk} :n alapuolelle. Ilmeisesti sydänpuun muodostumiseen liittyy kutistumista, jonka syytä ei tunneta. Varsinainen kuivumishalkeama on säteen suuntainen halkeama, joka syntyy puun pintaosien kuivuessa ja kutistuessa nopeammin kuin sisäosat /4/. Pintahalkeamat ovat puun syyn suuntaisia rakoja. Pintahalkeamat syntyvät aina pyöreisiin pölkkyihin sekä sellaiseen veistettyyn tai sahattuun puutavaraan, johon ydin on jäänyt sisään. Pintahalkeilua voidaan vähentää kuivaamalla puutavara niin hitaasti, että kappaleen sisäosien kuivuminen ennättää seurata pintaosien kuivumista. Tosin pintahalkeilua ei voida kokonaan välttää, jos puu joutuu kuivumaan paljon alle puunsyiden

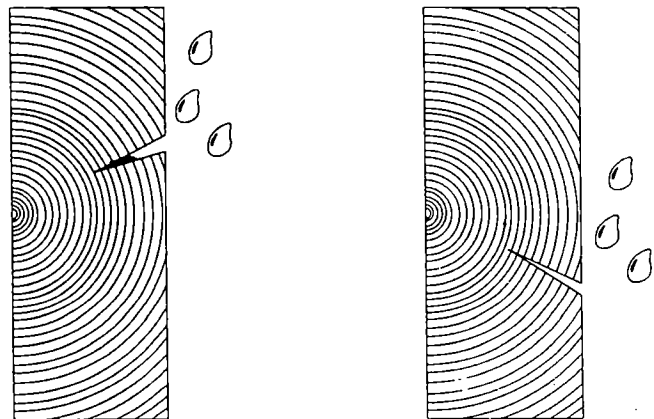
kyllästymispisteen, jossa kutistuminen alkaa /36/. Tällöin puun tangentin ja säteen suuntaisen kutistuman ero aiheuttaa tasaisesti kuivuvassa poikkileikkauksessa halkeilua. Kuvassa 22 on esitetty eri tyyppisiä halkeamia.



Kuva 22. Halkeamatyyppiä
Figure 22. Some crack models of wood.

Halkeamat muodostavat puutavaraan taskuja, joihin kertyvä kosteus, esim. sadevesi, muodostaa hyvät olosuhteet home-, sinistymä- ja lahosienten kehittymiselle /37/. Järeässä sahatavarassa halkeilun esiintyminen on todennäköistä suurten dimensioiden ja siitä johtuvan epätasaisen kuivumisen johdosta. Tämän vuoksi rakenteessa on mahdollisuuksien mukaan otettava huomioon halkeaman avautumissuunta, kuva 23.

Kuva 23. Halkeaman avautumissuunnan huomioonotto rakenteessa
Figure 23. Position of a crack in the wood; right: water can escape.



5.4.5 Laho ja muut viat

Eräs syy lahon aiheuttaman taloudellisen menetykseen on lahovikaisten runkojen huomattavasti terveitä suurempi kapeneminen. Lahojen runkojen runkomuoto oli huonompi kuin terveiden ja ero oli suurin 3,5...6,0 m:n välisellä rungon osalla. Ruotsalaisen tutkimuksen mukaan rungon kapeneminen oli n. 19 % suurempi lahoissa kuin terveissä puissa. /38/

Elävässä puussa laho esiintyy usein sen tyvässä eli rungon arvokkaimmassa osassa. Suomessa on havaittu, että puun pohjoispuolella laho etenee nopeammin kuin eteläpuolella. Puulajien luontainen lahonkestävyys vaihtelee suuresti, sillä koivu ja kuusi ovat alttiimpia laholle kuin mänty. Eurooppalaisista puulajeista vain kataja ja tammen sydänpuu ovat luontaisesti kestäviä lahoa vastaan. Saman puulajin ollessa kyseessä lahonkestävyyteen

vaikuttaa puun kaatoaika. Männystä on todettu, että massan vähenemisellä mitattu lahoutuminen on suurimmillaan kevätkaatoisessa puutavarassa ja pienimmillään talvikaatoisessa. Syynä on ilmeisesti yhteyttämistuotteiden erilainen määrä eri vuodenaikoina ja niiden liukoisuuden muuttuminen /9/. Lahoamisen alussa lujuuden aleneminen on voimakkainta ja yleensä lujuus alenee nopeammin kuin massan menetys edellyttäisi /9/.

Homeet elävät kostean puun pinnalla tunkeutumatta syvemmälle puuhun /9/. Ne käyttävät ravinnokseen puun pinnalla olevia ravintoaineita eivätkä yleensä vahingoita puun soluja.

Sinistymän esiintyminen havupuissa rajoittuu pintapuusiin /4/. Sinistyneen puun mekaaninen lujuus ei ole oleellisesti pienempi kuin terveeseen puun. Sekä männyllä että kuusella taivutuslujuus alenee sinistymän vaikutuksesta vain muutamia prosentteja /9/. Käytännön puunkorjukseen vaikuttaa se, että sinistäjäsienet iskeytyvät helpommin mäntyyn kuin kuuseen. Nykyaikainen koneellinen karsinta lisää voimakkaasti sinistymisvaaraa perinteelliseen kirves- ja moottorisahakarsittuun puutavaraan verrattuna. Metsän lannoitus ei lisää männyn sinistymistäipumusta. Sinistynyttä puuta voi käyttää normaalipuun tavoin, eikä se ole sen lahonarempaa kuin terve puu /9/. Joissakin tapauksissa sinistynyttä puutavaraa on vaikea kuivata /37/, sillä sienirihmastot täyttävät solujen huokokset ja kuivuminen hidastuu /4/. Jos puu pysyy pitkään märkänä lahottajasienet iskeytyvät siihen helposti /37/.

5.5 Kuormitustavan ja jännevälin vaikutus puun lujuuteen

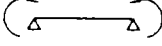


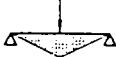



Tilastollinen lujuusteoria on kehittynyt heikoimman lenkin teorian pohjalta, jonka mukaan vedolle altistunut ketju on yhtä vahva kuin sen heikoin lenkki. Weibull osoitti kuinka heikoimman lenkin systeemin lujuus voidaan selittää eksponentiaalisesti kertyvän jakauman avulla ja kuinka lujuus riippuu koekappaleen tilavuudesta olettaen että virheet ovat tasanjakautuneita koko kappaleeseen. Hän vertasi teoriaa monilla haurilla aineilla tehtyihin kokeisiin, muttei ilmeisesti puuhun. Johnson paransi Weibullin eksponentiaalisen jakauman teoriaa ja arvioi jakauman kuvaavan kappaleen heikoimman osan ääriarvojen jakaumaa. Bohann, joka tutki virheetömien liimapuupalkkien lujuutta, ehdotti ensimmäisenä että Weibullin heikoimman lenkin teoria soveltuisi puuhun. Parhaimman sovitteen koetuloksiin hän sai käyttäen sovitetta, jossa kappaleen pituus kerrottiin leveydellä eikä tilavuudella kuten teoria ennusti. /32/

Weibullin teorian mukaisesti on oletettu, että puukappaleen lujuus on sama kuin heikoimman kohdan lujuus ja että lujuus on koko pituudella tällä alhaisella tasolla. Todellisuudessa rakenteellisen kappaleen lujuuden hajonta koko pituudella aiheuttaa sen, että kappaleen lujuus on verrannollinen siihen todennäköisyyteen, että heikko kohta sijoittuu alueelle, jossa vaikuttavat suuret jännitykset. Vaurio ilmenee, jos kappaleen heikoin kohta on tällä alueella. Puutavarassa heikot kohdat voivat olla esim. soluseinämän epäsäännöllisyyksiä, joista halkeamat alkavat. Halkeamien pituus vaikuttaa lujuuteen ja voidaan olettaa että halkeamat ovat materiaalisissa tasanjakautuneet koko tilavuuden alueelle. Makroskooppisia vikoja sahatavaraan aiheuttavat yleensä oksat sekä niiden aiheuttama vinosyisyys. Päinvas-
toin kuin epäsäännöllisyydet soluseinämissä nämä viat eivät ole tasanjakautuneet koko sahatavaran pituudelle. /32/

Vetokuormitukselle on ominaista se, että kappaleen pituuden kasvaessa sen lujuus heikkenee eli mitä pitempi kappale on sitä todennäköisempää on, että se sisältää suuren vian ja siten sillä on alhaisempi lujuus. Lujuuskokeissa vetokappaleiden koko poikkileikkaukseen vaikuttaa suuri vetojännitys. Oksan aiheuttama paikallinen syysuunnan poikkeama kappaleen reunassa on yleensä murtuman alkukohta oksan koosta riippumatta. Tapauksissa, joissa kappaleen reunoissa ei esiinny suurta vinosyisyyttä, murto tapahtuu yleensä kohdassa, jossa on suurin oksa. Vedossa kuormitus ei välity oksan läpi vaan voiman on kierrettävä oksa ja se aiheuttaa kuormituksen lisääntymisen oksan molemmilla puolilla. Murto seuraa pienentyneen poikkileikkauksen aiheuttamasta jännityksen lisääntymisestä. Oksan koko sekä vinosyisyyden paikka ja suuruus ovat ratkaisevia tekijöitä kappaleen vetolujuuden kannalta. Todennäköisyys sille että syiden suunnassa on iso häiriö on kappaleen pituuden funktio. /32/

Puristuskappale muistuttaa vetokappaletta, sillä aksiaalinen kuorma on yleensä jatkuva koko kappaleen pituudella. Paikallinen vinosyisyys ei vaikuta puristuksessa yhtä paljon kuin vedossa. Jos sauvan nurjahdus on estetty ja kysymyksessä on puhdas puristuslujuus, niin suurilla kuormilla puuhun kehittyä puristusryppyjä eli puun syyt nurjahtavat.

Taivutuksessa tilanne muuttuu, sillä useimmissa käytännön tilanteissa taivutusmomentti ei ole vakio koko kappaleen pituudella. Suuren vian esiintymistodennäköisyyden lisäksi on kyse siitä, millä todennäköisyydellä vika sijoittuu sinne, missä suurin taivutusmomentti esiintyy. Keskeisesti kuormitetun palkin murtolujuus on suurempi kuin esim. kolmannespisteistään kuormitetun, sillä todennäköisyys sille, että vika on lähellä keskipeitettä, on pienempi kuin että se on keskimmäisen kolmanneksen alueella, jossa on vakiomomentti. Jopa silloin kun taivutusmomentti on vakio koko palkin alueella, kolmion mallinen jännitysten jakautuminen poikkileikkauksen alueella aiheuttaa sen, että suurelle taivutusjännitykselle altistuu pienempi osuus koko materiaalityluvudesta puhtaaseen vetojännitykseen verrattuna. Kolmannespisteistään kuormitetussa sauvassa vakiomomentin alueella alin 10 % palkista altistuu suurelle vetojännityksille (yli 80 % maksimijännityksestä) ja koska tämä tapahtuu vain keskimmäisessä kolmanneksessa, vain n. 3 % koko palkin tilavuudesta on suuren jännityksen vaikutuksen alaisena. Vedossa koko kappaleen tilavuus on suuren vetojännityksen alaisena ja sen vuoksi vetolujuus on pienempi kuin taivutuslujuus. Taivutuksessa paikallinen syyhäiriö palkin vetovyöhykkeessä vaikuttaa kuten vedetyssä kappaleessa ja se on yleisin sahatavaran murtosyy. Taivutuskappaleessa lujuuteen vaikuttaa kaksi eri pituustekijää. Toinen riippuu materiaaliominaisuuksista ja on suhteessa virheen löytymisen todennäköisyyteen. Toinen riippuu kuormitustavasta, joka voi vaihdella koko kappaleen jännevälillä vaikuttavasta vakiomomentista vähemmän vaaralliseen keskeisen kuorman tapaukseen. Madsen /32/ on esittänyt, että taivutuksessa kuormitustavan vaikutus rakenneosan lujuuteen voidaan ottaa huomioon kuten kuvassa 24. Vertailutapauksena ensimmäisessä sarakkeessa on vakiomomentin kuormittama, toisessa kolmannespisteistään kuormitettu ja kolmannessa tasaisesti jakautuneen kuorman kuormittama sauva.

Perustapaus <i>Base</i>	Vakiomomentti <i>Constant moment as base</i>	Kuorma kolmannes- pisteissä <i>3 rd point loading</i>	Tasainen kuorma <i>UDL</i>	Suositus <i>Recommended values for code purposes</i>
	1,00	0,87	0,84	0,85
	1,15	1,00	0,96	0,95
	1,20	1,04	1,00	1,00
	1,40	1,22	1,17	1,15
	1,40	1,22	1,17	1,15
	1,55	1,35	1,30	1,30
	1,65	1,43	1,38	1,40

Kuva 24. Eri kuormitustapojen muuntaminen vastaamaan tasaisesti jakautunutta kuormaa. /32/

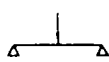
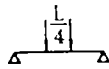

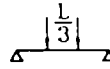
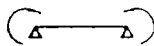
Figure 24. The influence of varying loading conditions on the strength of a beam. /32/

Vikojen määrä ja suuruus kasvaa, kun kappaleen pituus lisääntyy. Mitä pitempi kappale on, sitä suurempi on todennäköisyys, että se sisältää paikallisen syyhäiriön joka jouduttaa murtoa. Paikallisen vinosityyden todennäköisyys siis riippuu kappaleen pituudesta mutta ei korkeudesta. Suuren oksan todennäköisyys riippuu sekä kappaleen pituudesta että korkeudesta. Tämän vuoksi vetokappaleessa havaitaan sekä pituus- että korkeusvaikutus. /32/

Madsen /32/ havaitsi 38 mm leveän sahatavaran vedossa, taivutuksessa ja puristuksessa selvän ja yhdenmukainen pituusvaikutuksen. Taivutuksessa koekappaleen korkeuden vaikutukselle hän sai ristiriitaisia tuloksia. Vedossa korkeuden vaikutus oli yhdenmukaisempi kuin taivutuksessa ja vaikutuksen suuruus riippui puulajista. Puristuksessa ei korkeusvaikutusta havaittu. Taivutuksessa leveydellä ei ollut vaikutusta virheettömän puun lujuuteen, kun taas normaalin sahatavaran paksuuden kasvaessa sen lujuus kasvoi. Sahatavaran lujuuslajittelumenettelyn ansiosta paksuuden kasvulla on positiivinen vaikutus lujuuteen. Kimmomodulin arvot kasvoivat selvästi pituuden kasvaessa. Madsenin arvion mukaan on todennäköistä ettei kasvua voida selittää tilastollisella lujuusteoriolla vaan siihen vaikuttaa lisäksi joku muu ilmiö. Leikkausmurto harvoin määrää mitoitus, mutta liimapuulla näin voi olla. Syiden suuntaa vastaan kohtisuoralle vedolle kokovaikutus on suuri ja sen vaikutus on huomioitu monissa kaarevien liimapuukurakenteiden puunormeissa. Lisätutkimusta tarvitaan, sillä vetolujuus kohtisuoraan syitä vastaan on tärkeä kaikissa puutuotteissa, erityisesti liitoksissa. Puristuksessa kohtisuoraan syitä vastaan kokovaikutukseen vaikuttaa eniten jännitysten keskittyminen. Taulukossa 1 on esitetty eri kuormitustapojen ja jännevälilin vaikutus lujuuteen Madsenin koetulosten perusteella. /32/

Taulukko 1. Kuormitustavan ja jännevälin vaikutus suunnittelulujuuteen, kun vertailukohteena on tasaisesti jakautunut kuorma jännevälinällä 3 m. /32/

Table 1. The effect of the load distribution and the span on the bending strength, as comparison an evenly distributed load on a 3 meter span /32/.

Pituus Length m					
1,0	1,44	1,30	1,25	1,20	1,06
1,5	1,32	1,20	1,15	1,10	0,98
2,0	1,24	1,12	1,08	1,04	0,92
2,5	1,20	1,08	1,04	1,00	0,88
3,0	1,15	1,04	1,00	0,96	0,85
4,0	1,09	0,99	0,95	0,91	0,81
5,0	1,04	0,94	0,90	0,86	0,77
6,0	1,00	0,91	0,87	0,84	0,74
8,0	0,94	0,85	0,82	0,79	0,70
10,0	0,91	0,82	0,79	0,76	0,67

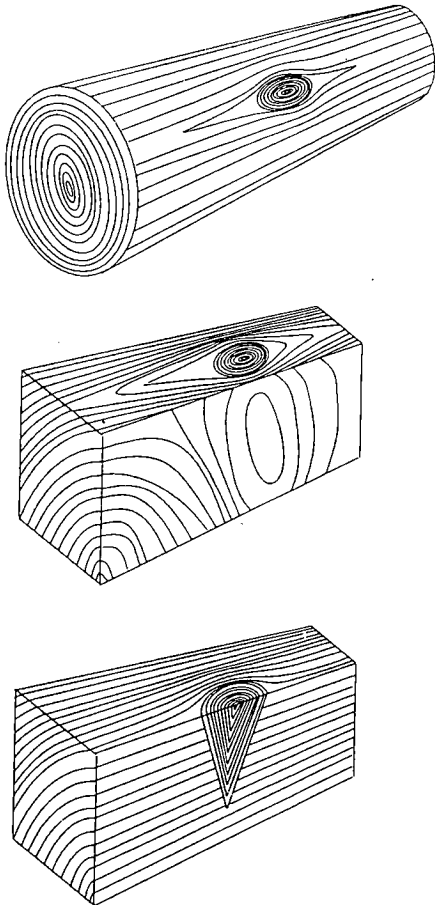
5.6 Poikkileikkauksen muodon vaikutus puun lujuuteen

5.6.1 Pyöreä puutavara

Suomen rakennusmääräyskokoelman /40/ mukaan pyöreän puutavaran taivutuslujuus vastaa sahatavaran lujuusluokkaa T30. Verrattaessa talonrakennuksessa käytettäviä lujuuksia mm. pylväsmitoitukseen, voidaan todeta että pyöreän puupylvään lujuusarvot ovat korkeat. Talonrakennuksen alalla puulle ei sallita niin suuria jännityksiä. Kuitenkin puupylväällä on jopa korkeampi varmuusmarginaali kuin monilla talonrakennuksen alalla käytettävillä tuotteilla. Kokeissa on todettu märän suomalaisen mäntypylvään taivutuslujuuden keskiarvoksi n. 50 MPa ja vastaavaksi hajonnaksi 5 MPa /35/. Pylväiden taivutuslujuuden hajonta on n. 10 % keskiarvosta, kun sahatavaran vastaava hajonta on 25...30 % /35/. Pylvään hajonnan pienuudella on käytettäviin mitoitusarvoihin erittäin suuri merkitys, jopa suurempi kuin itse lujuuden keskiarvon suuruudella. Hajonnan pienuus johtuu suuresti samoista seikoista kuin lujuus. Oksat ja muut viat suurentavat voimakkaasti hajontaa ja niiden vaikutus on pylväessä pienempi kuin työstetyssä puussa. /35/

Puun lujuus on sen tiheyden funktio. Puuaineen tiheys vaihtelee sen mukaan, onko se sydän- vai pintapuuta tai peräisin puun tyvi- vai latvaosasta. Puun tyvi on luonnostaan tiheämpää kuin latvaosat. Näin ulokepylvään rasetuin osa on automaattisesti lujuudeltaan parasta osaa puun rungosta /35/. Tavanomaisessa rakenteessa puu voi olla peräisin mistä tahansa näistä kohdista, mutta pylväessä tiedetään puun sijoittuvan aina samalla tavalla ja näin jää eräs hajontaa aiheuttava tekijä pois. Mäntypuu on luonnossa joutunut erilaisten kuormien testaamaksi. Niiden vaikutus muistuttaa suuresti johtimia kannattavaan ulokepylväeseen kohdistuvien kuormien vaikutuksia: /35/

- männyn latvus vastaa painoltaan ja tuulipinnaltaan tiettyjä, tosin verraten keveitä johtimia
- rungon tuulipinta ja omapaino ovat olleet hieman pylvästä suuremmat kuoren aiheuttaman paksuuslisän ja tuoreen puun suuremman vesipitoisuuden johdosta
- latvukseen kerääntynyt lumi vastaa tiettyjen johtimien jääkuormaa; lämpimiin maihin tarkoitetuissa pylväissä tämä on ollut ylimääräinen lujuudesta



Kuva 25. Oksan vaikutus pyöreän puun ja sahatavaran syiden katkeamiseen.

Picture 25. The effect of a knot on the continuity of the fibres in round wood and sliced wood.

Edellä mainitut kuormitukset ovat tapahtuneet puun ollessa täysin tuore, jolloin puun lujuus on ollut pylvään käyttötilaa alhaisempi suuren vesipitoisuuden johdosta. /35/

Oksat ovat sahatavaran lujuuteen ehkä voimakaimmin vaikuttavat viat. Pyöreässä puussa oksa on kohtisuorassa pintaa vastaan ja syyt kiertävät sen eheinä, kuva 25. Sahatussa kappaleessa oksa aiheuttaa syiden katkeamisen, jolloin isot oksat johtavat aina voimakkaaseen lujuuden laskuun. Ulokepylväessä eniten rasitetussa kohdassa maanrajan tienoilla oksat ovat aina pieniä, umpeenkasvaneita eli kyljestyneitä ja pylvään pinta on ehyt. Taivutuksessa maksimijännitykset esiintyvät puun pinnassa, jolloin sisälle jääneiden oksien merkitys lujuuteen on erittäin pieni. /35/

Vinosyisyys heikentää huomattavasti mekaanisesti muotoillun puun lujuutta. Tämä johtuu puun työstön yhteydessä tapahtuneesta syiden katkeamisesta. Pylväessäkin esiintyy vinosyisyyttä ja kierteisyyttä, mutta pylvään pinnan sorvauksen vähäisen asteen vuoksi syiden katkeamista tapahtuu erittäin vähän ja lujuuden aleneminen vinosyisyyden johdosta jää pieneksi. /35/

Jos oletetaan puun lujuus normaalisesti jakautuneeksi ja ominaislujuuden vaadittavaksi var-

muustasoksi 0,95 (vastaa talonrakennuksessa käytettävää menettelyä) saadaan puupylvään ominaislujuudeksi f_k :

$$f_k = 50 \text{ MPa} - 1,645 \times 5 \text{ MPa} = 41,8 \text{ MPa}$$

Luku 1,645 on normaalian jakauman 0,95-fraktiilia vastaava kerroin. Rakennesuunnittelussa käytettävän menettelyn mukaan ominaislujuutta pienennetään vielä materiaalivarmuuskertoimella. Sen arvoksi otetaan yleensä 1,3 ja sitä voidaan pienentää 10 % varasto- ym. rakennuksissa, joissa vaurioitumisriskit ovat suhteellisen pienet eivätkä yleensä johda

henkilövahinkoihin. Johdinpylvään murtumisseurausten voidaan yleensä olettaa olevan sellaisia, että 10 % alennuskerrointa voidaan soveltaa. Tällöin mitoitusjännitykseksi saadaan

$$f_{kd} = 41,8 / (1,3 \times 0,9) = 35,7 \text{ MPa}$$

Talonrakennuksessa f_{kd} :n arvoksi saataisiin $41,8/1,3 = 32,2$ MPa. Pylväslaskelmissa sovellettavaksi mitoitusjännitykseksi f Suomessa otetaan kuitenkin 25,2 MPa, jolloin ylimääräinen varmuus on

$$\gamma = 35,7/25,2 = 1,42$$

Talonrakennuksen puolella γ pienenee arvoon $32,2/25,2 = 1,28$. Ylimääräinen varmuus voidaan käyttää hyväksi pylvään käyttöön lisänä. Näin voidaan pylvään antaa turmeltua esim. biologisista syistä $100/1,41=70,6$ %:iin alkuperäisestä lujuudestaan vaadittava varmuustaso kuitenkin säilyttäen /35/.

Pylväiden suunnittelussa on käytetty yleensä kokonaisvarmuutta 2,5. Koska materiaali-varmuustekijöiden lisäksi käytetään kuormien yhteydessä osavarmuuskertoimia, saadaan muuttuvien kuormien tapauksessa lujuuskeskiarvon kokonaisvarmuuskertoimeksi

$$\gamma = 50 \text{ MPa} / (25,2/1,4) \text{ MPa} = 2,8$$

5.6.2 Sahatavara

Kun pyöreä puunrunko sahataan sahatavaraksi, oksien suhteellinen koko poikkileikkaukseen verrattuna ja niiden sijainti muuttuvat epäedullisemmaksi. Suunnittelussa käytettävät lujuusarvot on määritetty pienistä, virheettömistä koekappaleista ja vain harvoja täysimittakaavaisia kokeita on tehty /32/. Hyvälaatuisen kuusisoiron $50 \times 100 \text{ mm}^2$ taivutuslujuus on 60 % ja $75 \times 200 \text{ mm}^2$ lankun 50 % pienen koekappaleen lujuudesta. /13/

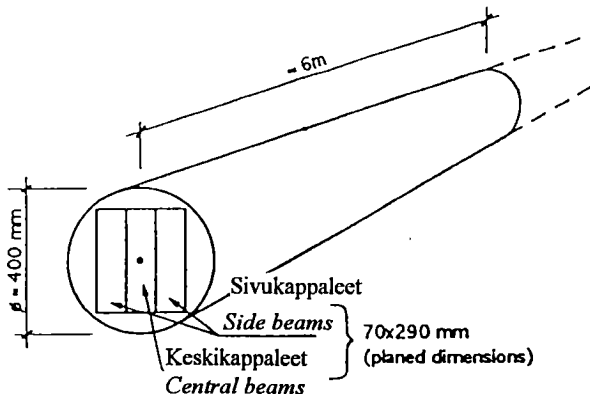
Vetomurto on hauras murtuma mutta puristusmurto sitkeämpi ja siinä tapahtuu kuormituksen uudelleenjakaantumista heikoimmassa poikkileikkauksessa. Kokovaikutus sitkeässä murrossa on pienempi kuin hauraassa, joten kokovaikutus riippuu myös sahatavarakappaleen lujuudesta /32/. Lujuuden kasvaessa kokovaikutus pienenee ja lähestyy virheettömästä puusta mitattuja arvoja. Suomessa sahatavaran lujuutta laskettaessa ei käytetä korkeuden vaikutusta huomioivaa kerrointa. Eurocode 5:ssa veto- ja taivutuslujuusarvot on annettu sahatavarakappaleelle, jonka suurin mitta $h = 150 \text{ mm}$. Kun poikkileikkauksen suurin mitta $h < 150 \text{ mm}$, niin veto- tai taivutuskuormitetun sauvan ominaislujuusarvoja saadaan korottaa kertoimella k_h /39/, kaava (3), jonka arvo suurimmillaan on 1,3

$$k_h = (150/h)^{0,2} \quad (3)$$

Vaikka Weibullin teorian mukaan kappaleen koon kasvaessa, sen lujuus pienenee, ei jännevälin vaikutusta ole huomioitu suunnitteluohjeissa sen enempää Suomessa kuin Euroopassakaan.

5.6.3 Järeä sahatavara

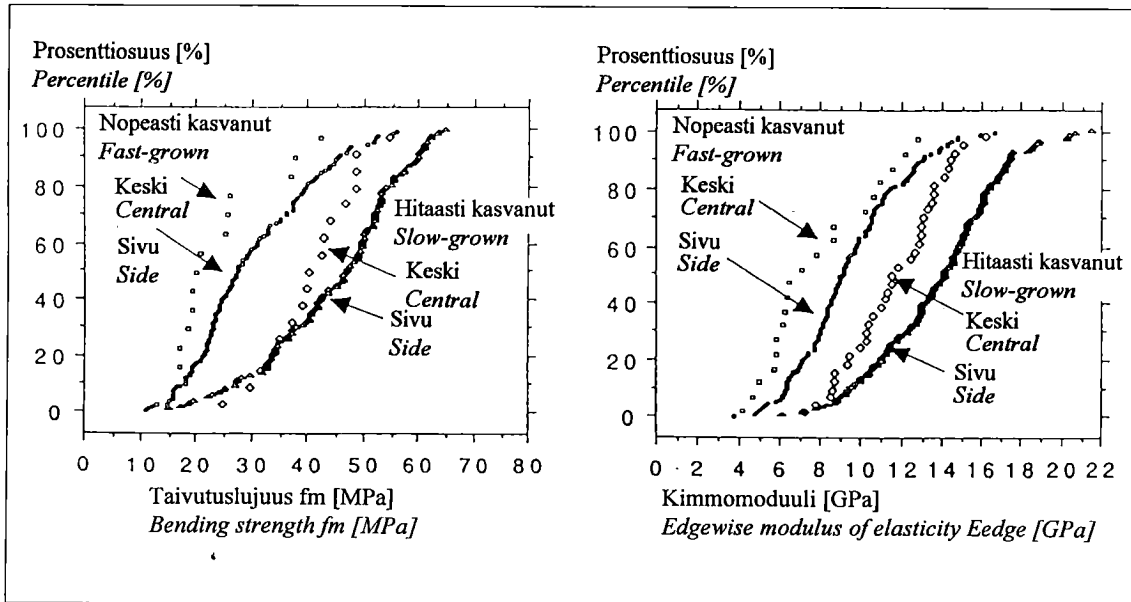
Suomessa esimerkiksi höylähirren lujuusluokkana käytetään T24 ellei lujuuslajittelulla nosteta lujuusluokkaa /41/. Perstorper, Klinger ja Johansson /29/ ovat tutkineet sahatavaran rakenteellisia ominaisuuksia ja lujuusluokittelua ja tulleet siihen tulokseen, että mm. visuaalinen lujuuslajittelu ruotsalaisen T-lajittelun perusteella aliarvioi järeän sahatavarakappaleen lujuus- ja jäykkyysominaisuuksia. Kuvassa 27 on esitetty kokeissa saatuja taivutuslujuuden f_m ja kimmomodulin E arvoja eri kohdista tukkia sahatuille (kuva 26) sekä nopea- että hidaskasvuille koekappaleille. Taivutuksessa kaikki sahatut kappaleet koestettiin. Kuvassa 27 näkyy selvä ero hidas- ja nopeakasvuisten välillä, tosin ero pienenee heikommassa päässä. Ydinkeskeisellä sahatavaraalla on hieman heikommät mekaaniset ominaisuudet kuin sivukappaleilla.



Ydinkeskeisellä sahatavaraalla on hieman heikommät mekaaniset ominaisuudet kuin sivukappaleilla.

Kuva 26. Ydinkeskeisten (central beam) ja ytimen vierestä sahattujen (side beam) koekappaleiden sijainti. /29/

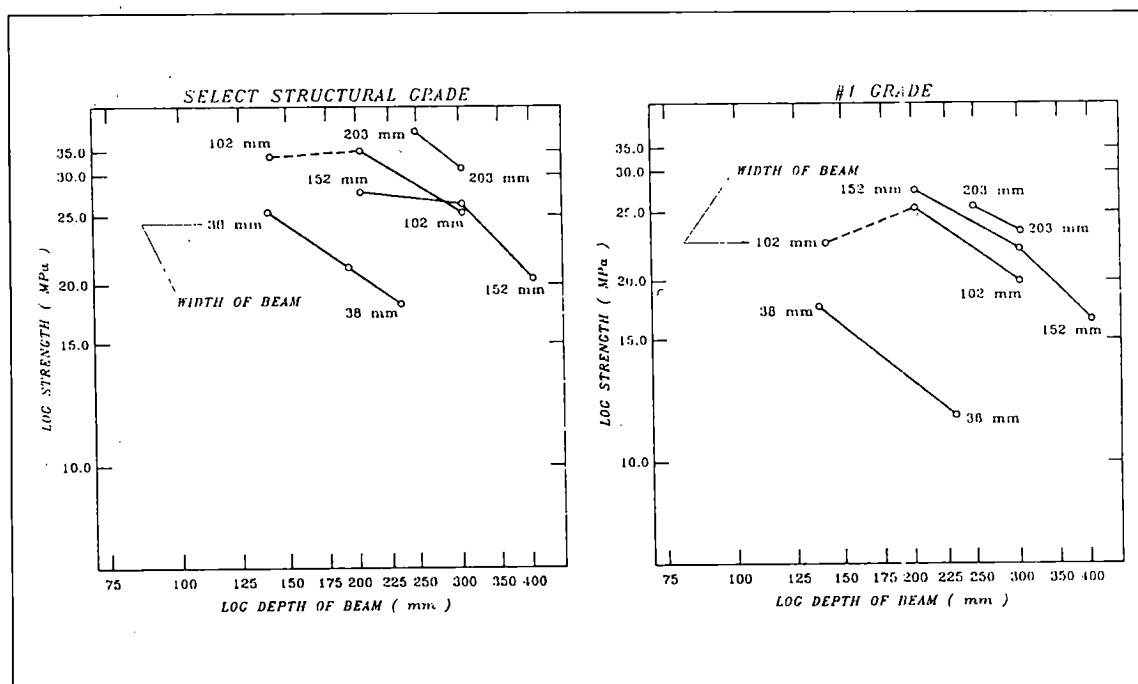
Figure 26. The specimen



Kuva 27. Koekappaleiden taivutuslujuus f_m (bending strength) ja kimmomoduli E (modulus of elasticity). Poikkileikkauksen koko on $70 \times 290 \text{ mm}^2$ ja kosteus 13,5 %. Kuvissa on eroteltu hidas- (slow-) ja nopeakasvuinen (fast-grown) puuainne, sekä ydinkeskeiset (central) että ytimen sivusta sahatut (side) kappaleet. /29/

Figure 27. The bending strength f_m and the modulus of elasticity E for the specimen. The cross section is $70 \times 290 \text{ mm}^2$ and the moisture content is 13.5 %. /29/.

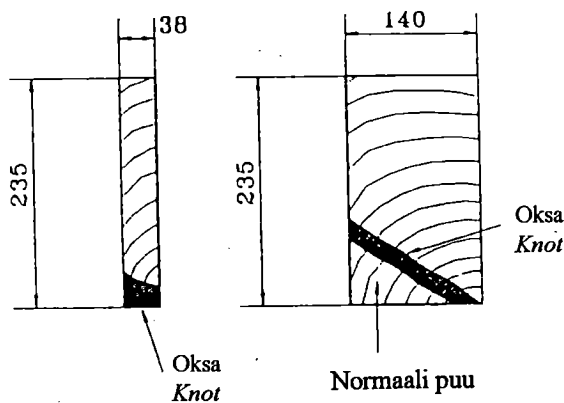
Madsen /32/ on kanadalaisen männyn (Douglas Fir) taivutuskokeissa saanut tulokseksi, että suurimmilla palkeilla oli myös suurin lujuus, kuva 28. Koetuloksista on nähtävissä myös se, että kun leveys pidetään vakiona, niin palkin korkeuden kasvattaminen heikentää lujuutta. Sen sijaan palkin leveyden kasvaessa lujuus kasvaa, kun korkeus pidetään vakiona.



Kuva 28. Tuoreen sahatavaran taivutuslujuuden (log strength), poikkileikkauksen leveyden (width of beam) ja poikkileikkauksen korkeuden (log depth of beam) välinen yhteys logaritmisessa asteikossa. Lujuuslajittelu on tehty Ontario Highway Bridge Design Coden mukaan./32/

Figure 28. The bending strength as a function of the width of the beam in logarithmic scale./32/

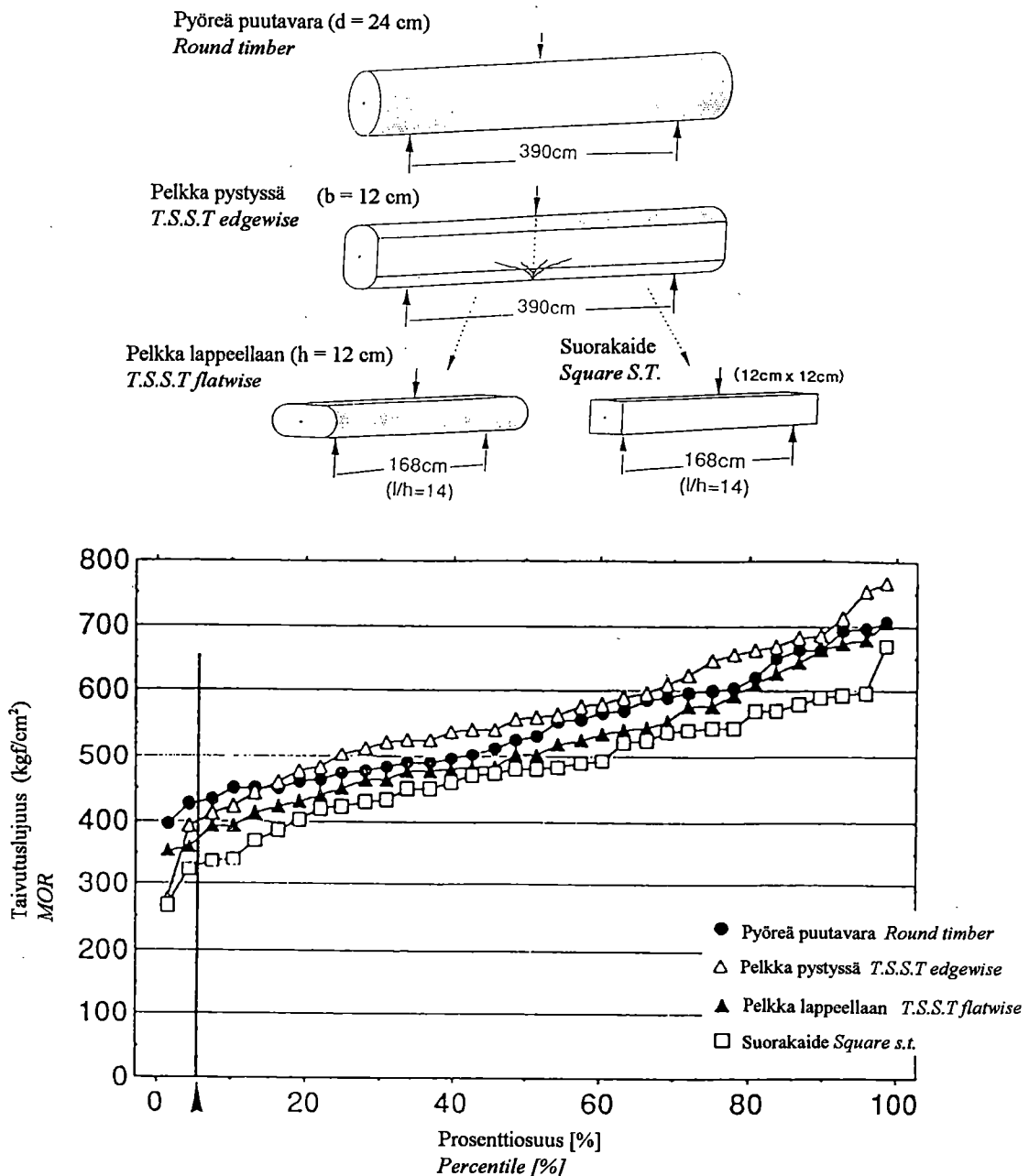
Madsenin koetulokset antavat viitteitä siitä, että heikoimman lenkin teoria, jonka perusteella poikkileikkauksen tilavuuden kasvaessa lujuuden pitäisi pienentyä, ei pitäisi paikkaansa järeässä puutavarassa. Tämä johtuu siitä, oksan osuus vetovyöhykkeestä pienenee leveyden kasvaessa, kuva 29. Lisäksi järeän kappaleen sisällä olevien, kylestyneiden oksien kohdalla pinta jää ehjäksi. Taivutuksessa oksien vaikutus ei tällöin ulotu ylä- ja alapinnan eniten rasitetuille vyöhykkeille, joten sisäoksien vaikutus lujuuteen on pieni.



Kuva 29. Oksan vaikutus kapeassa poikkileikkauksessa on suurempi kuin leveässä. /32/

Figure 29. The influence of a knot on the strength is bigger in a narrow section than in a wide section.

Nakain, Nagaon ja Tanakan tutkimusten /42/ mukaan pyöreän sekä kahdelta sivulta sahatun ja syrjälleen asetetun puun lujuuden ominaisarvojen voidaan olettaa olevan suurempia kuin neliösahatun. Sahaamattomien pintojen ehyempi syy rakenne parantaa kappaleen lujuutta poikkileikkauksen eniten rasitetuilla alueilla. Kuvassa 30 on esitetty keskeisesti kuormitetun palkin taivutuslujuus eri poikkileikkausmuodolle. Pyöreän, kahdelta sivulta sahatun (syrjällään ja lappeellaan) sekä neliöpoikkileikkauksen väliset suhteet olivat taivutuslujuudella 132:121:113:100 ja kimmomodulilla 114:120:103:100.



Kuva 30. Keskeisesti kuormitetun palkin murtolujuus (MOR) eri poikkileikkaus-muodoille. Tulokset on muunnettu 15 % kosteuspitoisuuteen. /42/

Figure 30. An example of modulus of rupture for different cross sections /42/.

6 KOKEET

6.1 Koeohjelma

6.1.1 Tavoite

Tavoitteena oli tutkia järeän sahatavaran taivutus- ja leikkauslujuus- sekä kimmo-ominaisuuksia. Järeän sahatavaran käyttäytymisen ja murtomekanismien avulla pyrittiin selvittämään, voidaanko puun luonnollisia ominaisuuksia hyödyntää niin, että järeä sahatavara vastaisi lujuusluokkaa T30. Lisäksi tutkittiin keväällä kaadetun ja sahatun, järeän sahatavaran kuivumismuodonmuutosominaisuuksia.

6.1.2 Tutkimusmenetelmät

Järeiden sahatavarakappaleiden lujuuskokeita varten kaadettiin helmikuussa 1993 VAKO-LAn lähistöltä, Vihdin kunnasta 10 järeää kuusta ja 6 mäntyä normaalin päätehakkuun yhteydessä. Kaadetuissa rungoissa ei ollut juurikäävän aiheuttamaa tyvilahoa tai tyvitervastautia. Tukeista sahattiin 26 standardimittoja suurempaa lankkua (normaalin saatavissa olevan sahatavaran suurin poikkileikkaus nykyisin 75×225 mm²). Sahattujen järeiden lankkujen pituudet olivat 7,55 m ja 10,5 m. Lankkuja kuivatettiin ilmakeivillä lämmittämättömässä konesuojassa marraskuun alkuun asti. Kuivumista seurattiin kappaleista otettujen kosteusnäytteiden avulla lokakuun alkuun saakka. Kosteusnäytteet otettiin kasvukairalla ja kairan reiät suljettiin puutulpalla haihtumisen minimoimiseksi. Kosteusnäytteet kuljetettiin ja säilytettiin muoviputkilossa, joka suljettiin muovitulpalla. Näytteet paloiteltiin, punnittiin ja kuivatettiin uunissa. Kuivauksen jälkeen näytepalat punnittiin ja niiden pituudet mitattiin.

Kaikki lankut käytettiin vikaisuustarkastelun koekappaleina. Lujuuskokeissa käytettyjen järeiden lankkujen poikkileikkauksen leveys $b \geq 100$ mm ja korkeus $h \geq 245$ mm. Ennen kuormitusta määritettiin niiden lujuusluokka visuaalisen lajitteluohjeen avulla. Koska kyseinen puutavara ylitti sekä sahatavaran että parrujen mitta- ja sivusuhteita, lajittelu suoritettiin näiden lajittelusääntöjä soveltaen. Vikojen määrä arvosteltiin kuten sahatavarassa.

Palkkikokeet suoritettiin siten, että kahdeksan lankkua kuormitettiin taivutusmurtoon ja kolme leikkausmurtoon. Lisäksi kahdella lankulla tehtiin kimmoinen taivutuskoe. Taivutuskokeessa kuormituspisteet olivat jännevälän kolmannespisteissä, leikkauskuorman etäisyys tuelta oli 2h. Kuormitetuista lankuista otettiin näytteet, joista määritettiin lankkujen kosteus ja tiheys punnitus-kuivaus-punnitusmenetelmällä. Lisäksi murtoon kuormitetuista lankuista ehjäksi jääneestä osasta otettiin puristuskoekappaleet kyseisen palkin puhtaan puristuslujuuden määrittämiseksi. Puristuskoekappaleiden kosteus koehetkellä määritettiin punnitus-kuivaus-punnitusmenetelmällä. Palkkikokeiden tulosten perusteella määritettiin järeän sahatavaran taivutus- ja leikkauslujuudet sekä kimmomoduli.

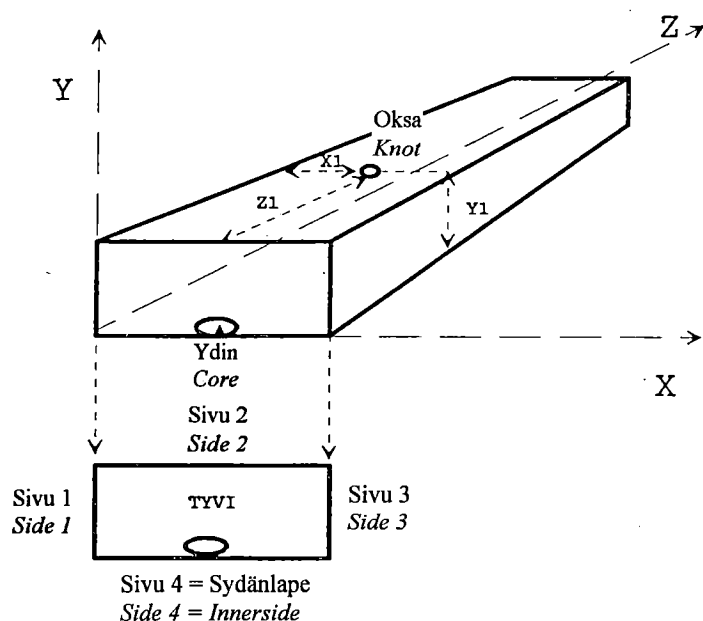
Keväällä 1993 sahattu järeä sahatavara ei marraskuuhun 1993 mennessä ehtinyt kuivua alle 20 %:in /21/, joten muodonmuutokset olivat hyvin pieniä. Lankut, joissa ydin oli jäänyt

kappaleen sisään, halkeilivat huomattavasti aikaisemmin kuin ytimen vierestä sahatut lankut /21/. Koska varsinaisesti kokeita varten sahatut järeät lankut eivät kuivuneet tarpeeksi nopeasti ja muodonmuutokset jäivät pieniksi, tutkittiin ytimen vierestä sahatun järeän lankun kuivausmuodonmuutoksia erikseen tukin tyvestä ja latvasta sahattujen, noin 5 cm paksujen kiekkojen avulla. Kiekoista sahattiin järeän lankun poikkileikkausta muistuttavia suorakaiteita, joita kuivattiin huoneilmassa 39 vrk. Tämän jälkeen käyristyneen poikkileikkauksen taipuma mitattiin koveralta puolelta. Taipuman suuruutta eli kovertumaa verrattiin Skaarin normaalille sahatavaralle määrittämän yhtälön, kaava (2), sekä yksinkertaistetun muodonmuutuskäsittelyn, liite L7, antamiin arvoihin. Koekappaleiden kosteus määritettiin punnitus-kuivaus-punnitus-menetelmällä.

6.2 Järeiden lankkujen vikaisuustarkastelu

Kaikki 26 järeäksi sahattua lankkua käytettiin vikaisuustarkastelun koekappaleina. Järeistä lankuista mitattiin poikkileikkauksen mitat tyvestä ja latvasta sekä lankun pituus. Lankkujen kiinnittäminen koordinaatistoon on esitetty kuvassa 31. Lankuista havaituista yli 5 mm suuremmista oksista mitattiin läpimitta, laatu ja sijainti. Oksien sijainnit määritettiin kolmella koordinaatilla. Lisäksi määritettiin lankkujen vuosilustojen leveydet, pihkarakojen sijainti, leveys ja pituus sekä vajasärmäisyydet. Mittauksissa noudatettiin T-lujuuslajittelun /43/ mittausohjeita.

Lankkujen lujuusluokat määritettiin oksatietojen perusteella sivuttain. Mikäli puun ydin oli lankun tyvestä tai latvasta lähempänä kuin 10 mm sydänlappen pintaa, ei sydänlapetta eli sivua 4 luokiteltu /43/.



Kuva 31. Poikkileikkauksen asema koordinaatistossa. /7/

Figure 31. The coordinate system for the cross section of the specimen.

6.2.1 Lujuusluokittelu

Lujuusluokitteluohjeiden sallimaa oksan paksuutta laskettaessa muodostettiin lankun tyvestä ja latvasta mitattujen mittojen perusteella funktio, jonka avulla sallittu oksan paksuus voitiin laskea lankun tyvestä mitatun oksan etäisyyden funktiona. Mikäli lankusta ei vajasärmäisyyden vuoksi ollut mittatietoja latvasta, latvan mittoina käytettiin tyvestä mitattuja mittoja. Luokittelussa käytettiin Utusen projektissa kehittämää Fortran-ohjelmaa

/7/. Alussa kaikkien lankkujen oletettiin kuuluvan lujuusluokkaan T40 ja oksahavaintojen tarkastelu aloitettiin tyvipäästä. Mikäli sivulla olevan oksan läpimitta oli suurempi kuin lujuusluokassa sallittu oksan läpimitta, lujuusluokkaa pudotettiin seuraavaan alempaan ja sallittu oksan paksuus laskettiin uudelleen uuden lujuusluokan vaatimusten mukaisesti. Tämän jälkeen luokittelua jatkettiin seuraavasta sivulla olevasta oksahavainnosta. Muita lujuusluokkaa mahdollisesti alentavia tekijöitä, esim. pihkarakoja tai vajaasärmäisyyttä, ei ohjelman avulla käsitelty.

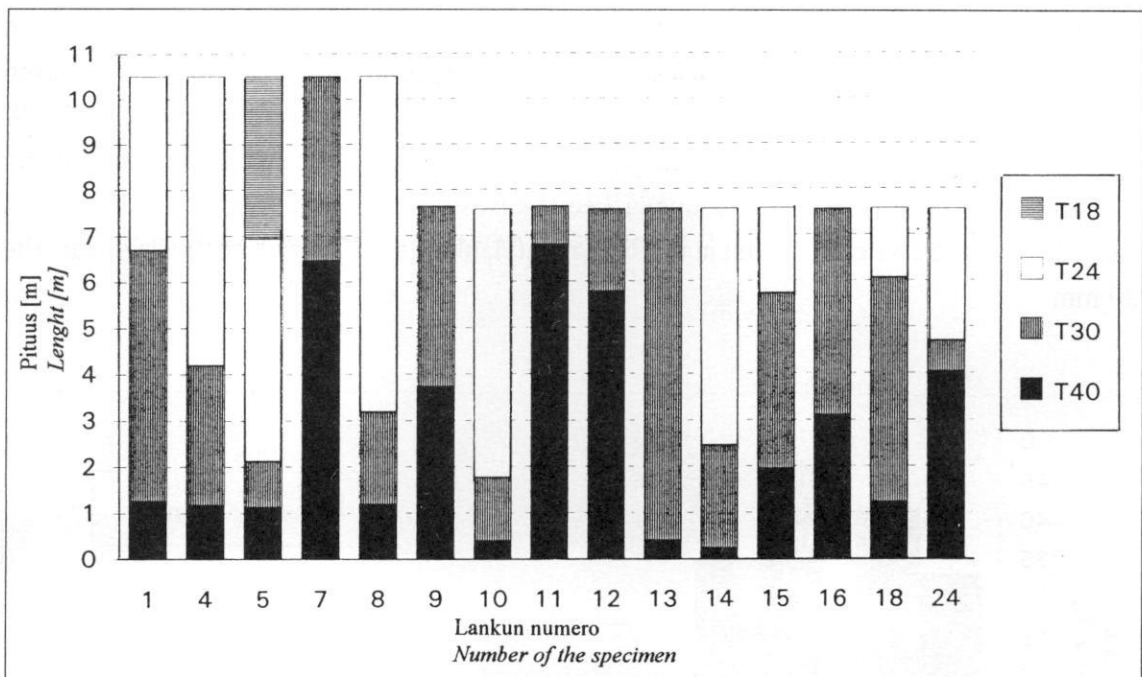
6.2.2 Tulokset

Utusen ohjelman mukaan saatiin seuraavat tulokset. Kuusen yleisin laatua alentava tekijä oli lapeoksa. Luokasta T40 luokkaan T30 siirtävänä syynä lapeoksa oli hieman harvinaisempi ($16/43 = 37\%$) kuin luokasta T30 luokkaan T24 ($11/20 = 55\%$). Männyn selvästi yleisin luokan alentumisen aiheuttanut syy oli lapeoksa. Viidessä mäntylankussa, nro:t 21, 22, 25, 26 ja 27, ei ollut lujuusluokkaa alentavia oksia. Lujuusluokan T40 kuusilankkujen pituus oli keskimäärin 259 cm ja lujuusluokan T30 lankkujen pituus 410 cm. Yhtä lukuunottamatta kaikki kuusilankut täyttivät lujuusluokan T24 vaatimukset koko pituudeltaan. Mäntylankuista saatiin kaikista vähintään viisi metriä luokkaan T40 luokiteltua sahatavaraa. Kaikkien lankkujen vikaisuustarkastelun antamat tulokset on esitetty taulukossa 2. Kuvissa 32 ja 33 on esitetty lankkujen lujuusluokkavyöhykkeet puulajeittain. Lujuuskokeissa käytetyistä lankuista yksi (nro 15) luokitettiin luokkaan T24 ja neljä (nro:t 9, 11, 13 ja 16) luokkaan T30 ja loput (nro:t 25, 26 ja 27) luokkaan T40. Alempan lujuusluokkaan siirrettyssä lankussa oli kuitenkin 5,73 m T30 vaatimukset täyttävää osaa. Kimmoisasti taivutetuista lankuista toinen oli luokkaa T24 (nro 14) ja toinen T30 (nro 12).

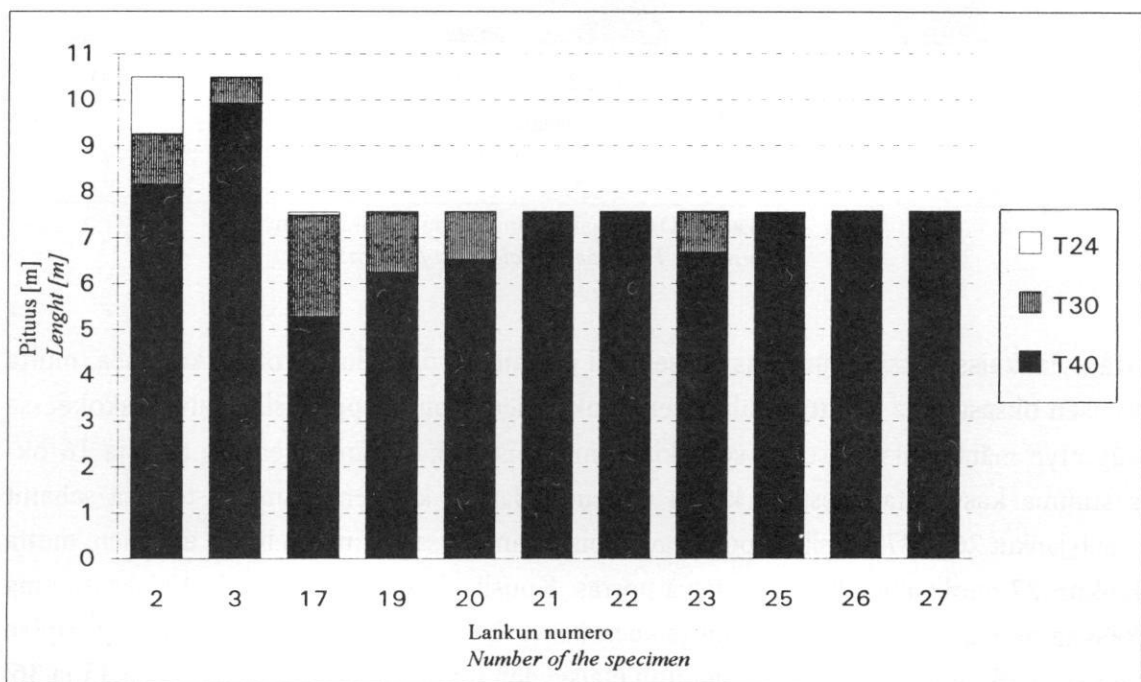
Taulukko 2. Koekappaleiden lujuuslajittelun yhteenveto.

Table 2. Summary of visual grading results for the specimens.

Kuusi nro Spruce No.	Pituus [m] Lenght [m]	Lujuus luokka Grade	Raja-pituus The distance from the bottom to satisfy the grade	Luokan pituus The lenght of the grade
1	10,5	T40	1,26	1,26
		T30	6,7	5,44
		T24	10,5	3,8
4	10,5	T40	1,17	1,17
		T30	4,2	3,03
		T24	10,5	6,3
5	10,5	T40	1,13	1,13
		T30	2,12	0,99
		T24	6,94	4,82
		T18	10,5	3,56
7	10,5	T40	6,46	6,46
		T30	10,5	4,04
8	10,5	T40	1,19	1,19
		T30	3,19	2
		T24	10,5	7,31
9	7,64	T40	3,73	3,73
		T30	7,64	3,91
10	7,57	T40	0,39	0,39
		T30	1,77	1,38
		T24	7,57	5,8
11	7,64	T40	6,8	6,8
		T30	7,64	0,84
12	7,57	T40	5,78	5,78
		T30	7,57	1,79
13	7,59	T40	0,4	0,4
		T30	7,59	7,19
14	7,57	T40	0,23	0,23
		T30	2,46	2,23
		T24	7,57	5,11
15	7,58	T40	1,94	1,94
		T30	5,73	3,79
		T24	7,58	1,85
16	7,56	T40	3,1	3,1
		T30	7,56	4,46
18	7,57	T40	1,22	1,22
		T30	6,07	4,85
		T24	7,57	1,5
24	7,55	T40	4,03	4,03
		T30	4,7	0,67
		T24	7,55	2,85
2	10,5	T40	8,16	8,16
		T30	9,25	1,09
		T24	10,5	1,25
3	10,5	T40	9,92	9,92
		T30	10,5	0,58
17	7,56	T40	5,27	5,27
		T30	7,49	2,22
		T24	7,56	0,07
19	7,57	T40	6,24	6,24
		T30	7,57	1,33
20	7,57	T40	6,52	6,52
		T30	7,57	1,05
21	7,57	T40	7,57	7,57
22	7,57	T40	7,57	7,57
23	7,57	T40	6,67	6,67
		T30	7,57	0,9
25	7,55	T40	7,55	7,55
26	7,58	T40	7,58	7,58
27	7,57	T40	7,57	7,57



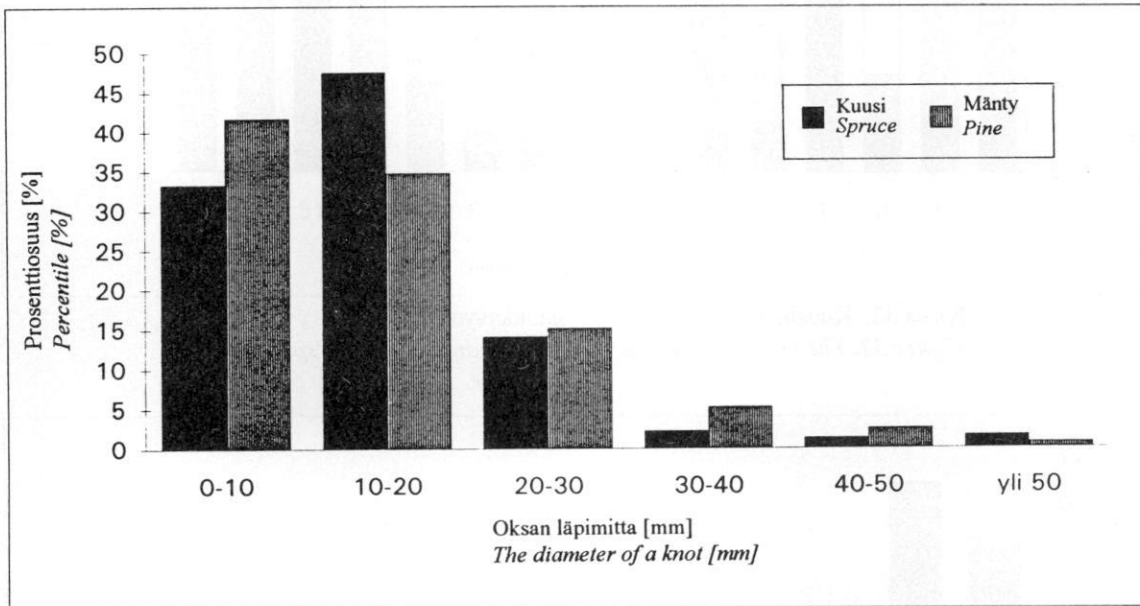
Kuva 32. Kuusikoekappaleiden lujuusluokkavyöhykkeet
Figure 32. The bending strength variation among the spruce specimens.



Kuva 33. Mäntykoekappaleiden lujuusluokkavyöhykkeet.
Figure 33. The bending strength variation among the pine specimens.

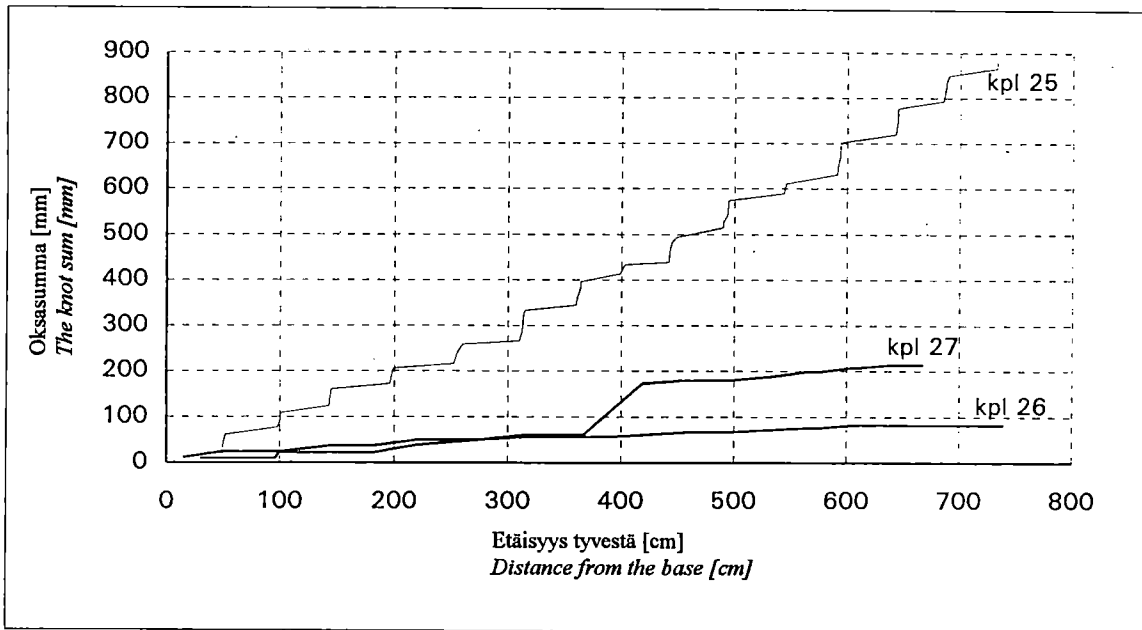
Lankkujen oksat jaettiin sahatavaran pituutta vastaan kohtisuoraan mitatun läpimitan perusteella kuuteen luokkaan: 0...10 mm, 10...20 mm, 20...30 mm, 30...40 mm, 40...50 mm ja yli 50 mm. Kuusilankuissa ei havaittu selvää yhteyttä kappaleen lujuusluokan ja oksien läpimittaluokkajakauman välillä. Mäntylankuista koko pituudeltaan luokkaan T40 luokiteltujen lankkujen oksien läpimittaluokkajakauma poikkesi selvästi muiden lankkujen oksien

läpimittaluokkajakaumista, sillä niissä ei ollut lainkaan läpimitaltaan suurempia kuin 40 mm oksia. Yhteenveto oksien jakautumisesta läpimittaluokkiin on esitetty kuvassa 34. Kuusen oksaläpimittajakauma painottuu alkupäähän. Eniten on oksia, joiden läpimitta on 10...20 mm, tätä suurempien oksien osuus pienenee nopeasti. Männyssä on eniten halkaisijaltaan alle 10 mm:n oksia ja luokkien osuus laskee tasaisesti alun huippukohdasta. Kuvasta 34 nähdään, että n. 80 % kuusilankun ja n. 76 % mäntylankkujen oksista on halkaisijaltaan alle 20 mm.

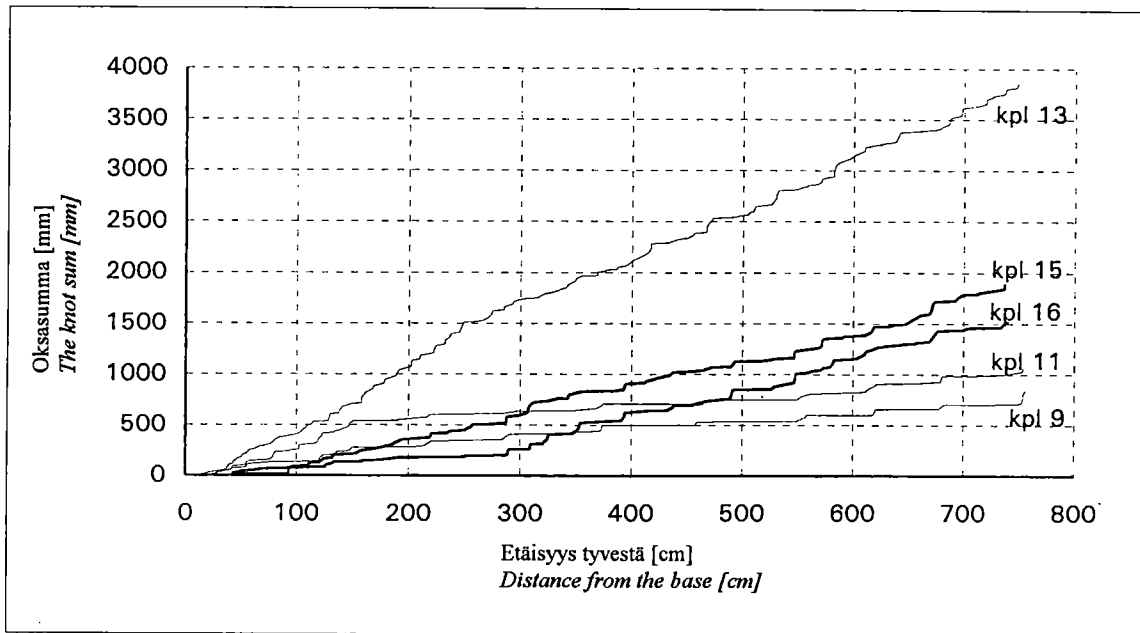


Kuva 34. Oksien jakautuminen läpimittaluokkiin.
Figure 34. The diameter classes of the knots.

Mäntylankuissa oksasumma kasvaa selvästi portaittain oksakiehkuroiden kohdalla, mutta kuusen oksasumma kehittyy välioksien vuoksi pienemmin hyppäyksin. Taivutuskokeessa käytetyn mäntylankun nro 25 sekä kiilan muotoisten kuusilankkujen nro:t 15 ja 16 oksasumma kasvaa tasaisesti ja kasvu nopeutuu latvaa kohden. Samasta tukista sahatut mäntylankut 26 ja 27 sen sijaan poikkeavat toisistaan. Oksasumma on hyvin alhainen, mutta lankun 27 puolivälin jälkeen on selvä porras. Kuusilankkujen nro 9, 11 ja 13 oksasumma kasvaa alussa mutta noin 1,5 m:n jälkeen kasvu hidastuu. Taivutuskokeissa käytettyjen lankkujen oksasumma tyvipästä mitatun etäisyyden funktiona on esitetty kuvissa 35 ja 36. Kiilapalkit on piirretty vahvemalla viivalla. Liitteessä L6 on esitetty kaikkien lankkujen oksasumat. Muutamaa poikkeusta lukuunottamatta lankkujen oksasumman kasvu nopeutuu latvaa kohden. Kuusilankkujen oksasumat laskettuna 7,5 metrin matkalta kappaleen tyvestä olivat noin 2,8 kertaisia verrattuna mäntylankkujen vastaavalta matkalta mitattuihin oksasummiin. Paksuin oksa ei ollut merkittävä virhe kuusilankuissa, sillä ainoastaan kolmessa kappaleessa 64:stä (4,7 %) lujusluokka aleni paksuimman oksan perusteella. Kolmessa mäntylankussa 11:stä (27,3 %) paksuin oksa aiheutti lujusluokan alenemisen. /7/



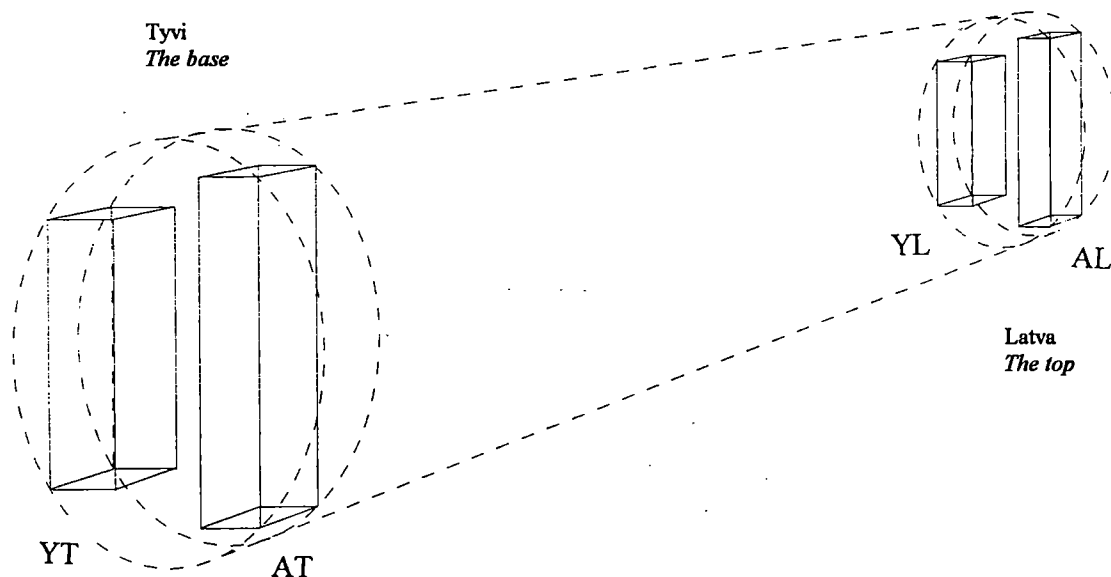
Kuva 35. Taivutuskokeessa käytettyjen mäntylankkujen oksasummat.
Figure 35. The knot sum for the tested pine specimens.



Kuva 36. Taivutuskokeessa käytettyjen kuusilankkujen oksasummat.
Figure 36. The knot sum for the tested spruce specimens.

6.3 Järeän sahatavaran kuivumismuodonmuutokset

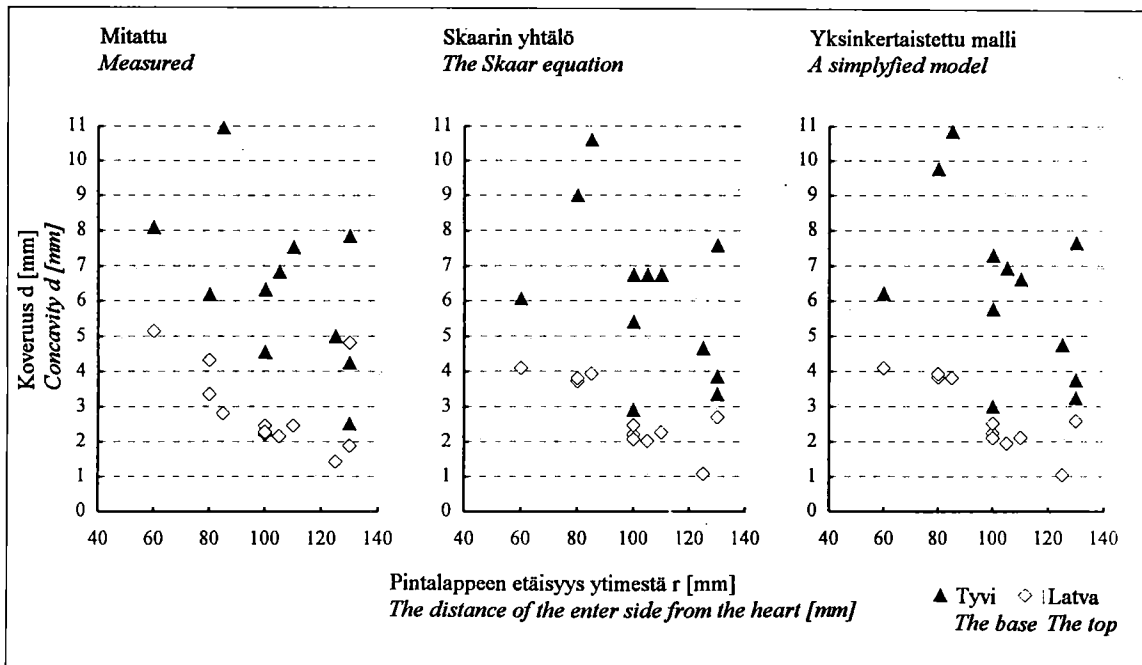
Järeän poikkileikkauksen kuivumismuodonmuutoksia tutkittiin siten, että kuudesta eri tukista sahattiin sekä tyvestä että latvasta noin 5 cm paksu kiekko. Kiekot sahattiin jäätyneistä ja tammikuussa 1994 kaadetusta tukeista. Kiekoista sahattiin 24 eri suorakaiteen muotoista poikkileikkausmallia siten että ydin ei jäänyt kappaleen sisään. Tyvi- ja latvakiekot muodostivat vastinparin, kuva 37. Aihioita kuivattiin huoneilmassa 39 vrk. Tämän



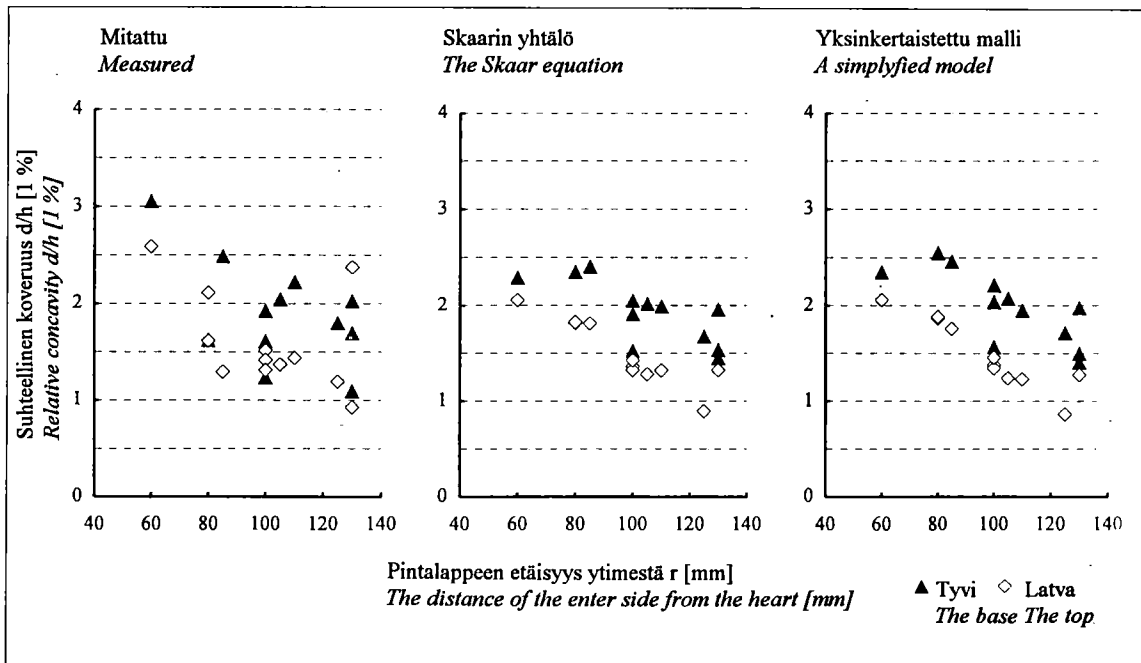
Kuva 37. Muodonmuutoskoekappaleiden sahaus ja vastinparien sijainti.
Figure 37. The specimens for concavity tests.

jälkeen käyristyneen poikkileikkauksen taipuma mitattiin koveralta puolelta. Koekappaleiden kosteus määritettiin punnitus-kuivaus-punnitus-menetelmällä.

Skaarin kaavan (2) lisäksi poikkileikkauksen koveruuden määrittämiseksi testattiin erittäin yksinkertaista, säteen- ja tangentinsuuntaisen kutistuman eroon perustuvaa laskentamenetelmää. Yksinkertaistettu menetelmä perustuu siihen, että järeän lankun poikkileikkauksen symmetria-akselilla ja kappaleen kulmissa olevat pisteet siirtyvät säteen ja tangentin suuntaisten kutistuman verran. Uuden poikkileikkauksen muoto ja koveruus lasketaan näiden pisteiden avulla. Menetelmä ei ota huomioon esim. sitä, että säteen ja tangentin suuntaisten kutistumien välisen eron aiheuttama yksittäisten pisteiden siirtymä ei sellaisenaan ole mahdollista isossa, yhtenäisessä poikkileikkauksessa, vaan puun sisäiset jännityseröt ja niiden aiheuttama viruma tasaa halkeilemattoman poikkileikkauksen vastin pisteiden siirtymiä. Yksinkertaistetun menetelmän laskentaperiaatteet on tarkemmin esitetty liitteessä L7. Kuvassa 38 on esitetty koveruuden mitatut ja lasketut arvot. Kuvan perusteella tyvikappaleen muodonmuutos on suurempi kuin latvakappaleen. Kun tarkastellaan koveruuden arvoa suhteessa poikkileikkauksen korkeuteen, kuva 39, havaitaan että kappaleiden välinen hajonta pienenee, mutta tyvi- ja latvakappaleet edelleen muodostavat omat ryhmänsä.

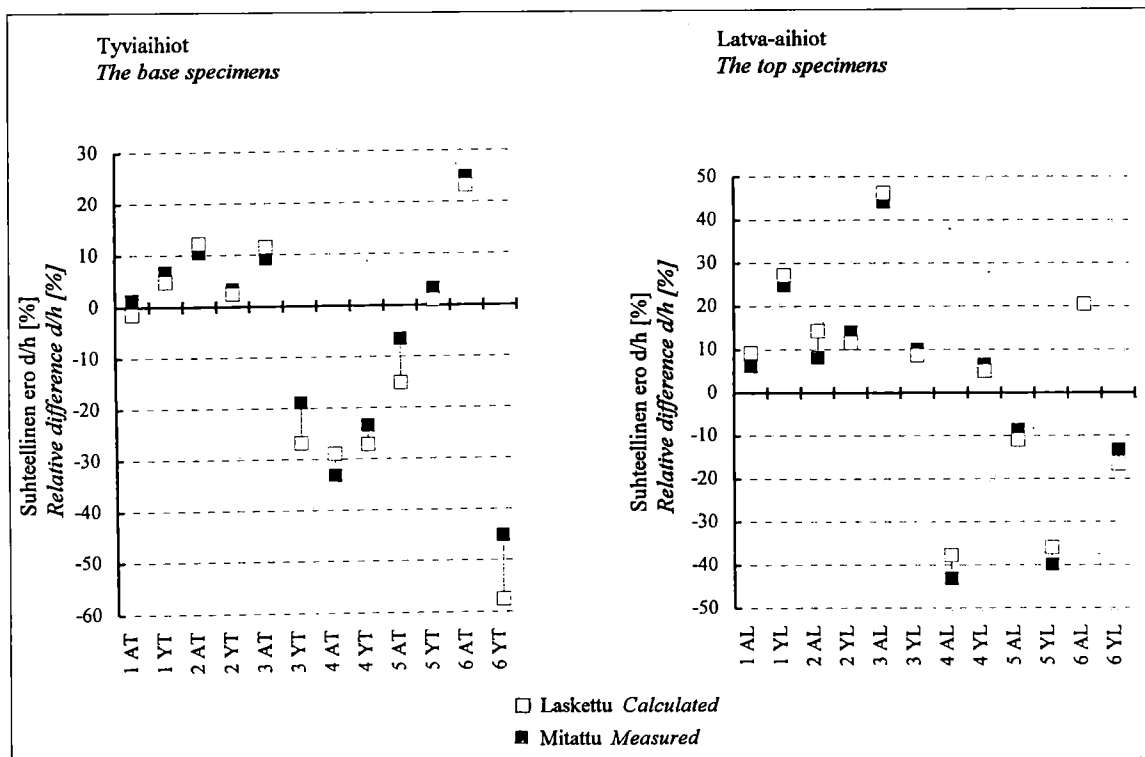


Kuva 38. Järeän poikkileikkauksen koveruuden ja pintalappeen etäisyyden ytimestä välinen yhteys.
Figure 38. The relation between concavity and distance from the wood centre to the outermost surface.



Kuva 39. Järeän poikkileikkauksen suhteellinen koveruus d/h (%).
Figure 39. The relative concavity of large-size timber.

Mitatun ja lasketun koveruman suhteellinen ero on esitetty kuvassa 40. Liitteessä L8 on esitetty taulukko mittaustuloksista. Vastinkappaleiden latva-aihion muodonmuutokset eroavat lasketuista vähemmän kuin tyviaihion. Selvää, yhdenmukaista eroa poikkeaman suunnassa ei voinut havaita mitattujen ja laskettujen arvojen välillä. Tyvikappaleen voimakkaampaan koverumiseen on syynä suurempi tiheys.



Kuva 40. Järeän poikkileikkauksen mitatun ja lasketun koveruuden suhteellinen ero $(d_m - d_c)/h$ (%). +/- merkki osoittaa että mitattu / laskettu on suurempi.

Figure 40. The concavity of large-size timber. The difference between measured and calculated values.

6.4 Lujuuskokeet

6.4.1 Koekappaleet

Koekappaleet olivat 6,5 ja 7,6 metrin mittaisia massiivipuupalkkeja. Ne oli sahattu kenttäsaahalla 22.-23.4.1993 saman vuoden helmi-maaliskuun vaihteessa kaadetuista, ulkona säilytetystä tukeista. Poikkileikkaukset vaihtelivat liitteen L1 mukaisesti, leveys välillä 98...145 mm ja korkeus 245...370 mm. Koekappaleet nro:t 9, 11, 12, 13, 14 ja 25 olivat suorakaidepalkkeja, nro:t 15, 16, 26 ja 27 kiilapalkkeja. Koekappaleiden kosteus lujuuskokeissa 16.-19.11.1993 oli 21,4...23,8 %, kts. liite L1.

Kuormitetuista kappaleista otettu kosteusnäyte oli kappaleen korkuinen ja poikkileikkaukseltaan n. 50×50 mm². Näyte paloiteltiin 6...8 osaan, näytteiden koot, kosteudet ja tiheydet liitteessä L4.

Kuormitettujen palkkien ehjäksi jääneestä osasta otettiin puristuskoekappaleet kyseisen palkin puhtaan puristuslujuuden määrittämiseksi. Kuormitetuista koekappaleista otettujen puristuskoekappaleiden koot olivat $92 \times 92 \times 250$ mm³.

6.4.2 Koejärjestelyt

Koekappaleet säilytettiin Maatalouden tutkimuskeskuksen maatalousteknologian tutkimuslaitoksen VAKOLAn tiloissa Vihdissä. Lämmittämättömässä konesusojassa oli peltikatto, lautaseinät ja sepelilattia. Ilmanvaihto oli luonnollinen. Konesuojan lämpötilaa ja ilman

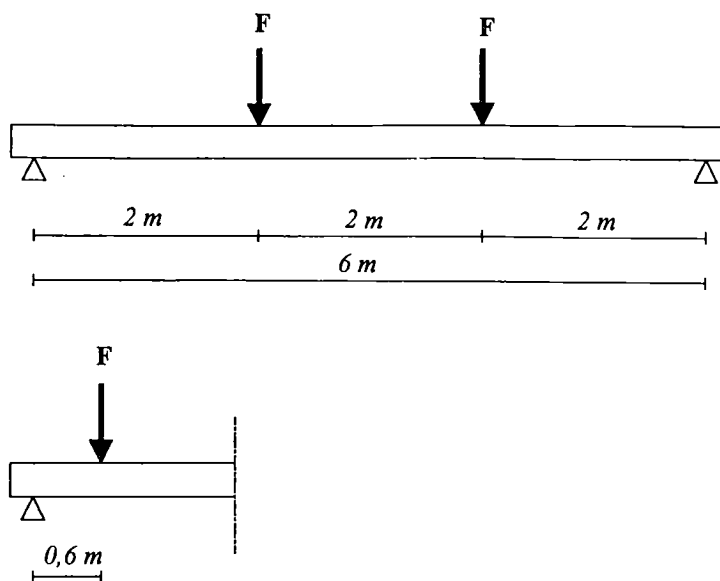
suhteellista kosteutta mitattiin termohydrografilla. Koekappaleet oli tapuloitu ja tapuli oli kiristetty kierretankojen, aluslevyjen ja mutterien avulla nippuun (liite L2). Kiristys käytiin tarkastamassa kerran viikossa ja se korjattiin tarvittaessa. Kuivumista seurattiin valituista kappaleista otettujen kosteusnäytteiden avulla 14.5. - 8.10. välisen ajan. Kosteusnäytteet otettiin kasvukairalla ja kairan reiät tulpattiin puutulpalla ylimääräisen haihtumisen minimoimiseksi. Kosteusnäytteet kuljetettiin ja säilytettiin muoviputkilossa, joka suljettiin muovitulpalla. Näytteet paloiteltiin noin 10 mm:n paloiksi, punnittiin ja kuivattiin uunissa +105 °C:ssa. Kuivauksen jälkeen näytepalat punnittiin ja niiden pituudet mitattiin työntötulkilla.

Lujuuskokeissa palkkien jänneväli oli kuusi metriä ja palkin päät olivat haarukkalaakeroidut. Taivutuskokeessa kuormituspisteet olivat jännevälin kolmannespisteissä ja niiden etäisyys tuesta oli 2,0 m. Leikkauksessa kuorman etäisyys tuesta oli 0,6 m.

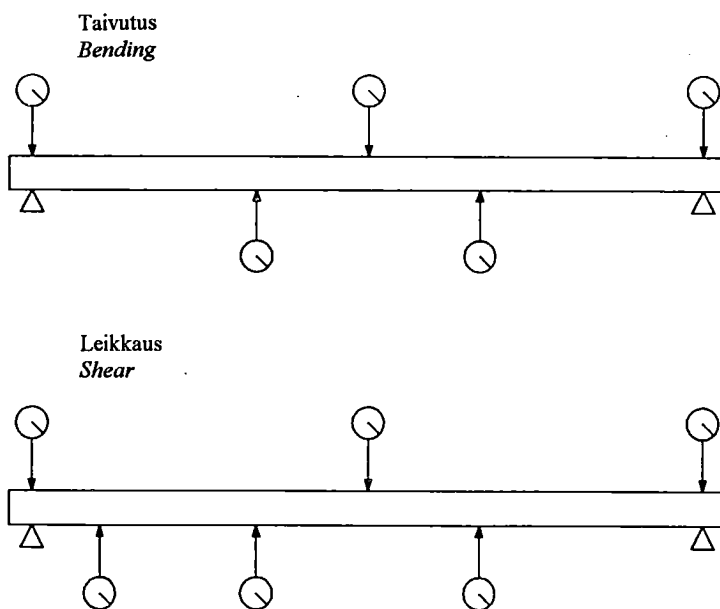
Palkki oli tuettu kiepahdusta vastaan kuormien kohdalta. Kuormitusjärjestelyt on esitetty kuvassa 41. Siirtymät mitattiin jännevälin keskeltä, kuormien kohdalta ja tulta, kuva 42. Neljässä palkissa (lankut 13, 16, 26 ja 27) kiinnitettiin palkin sivuun anturit puristus- ja vetovoimien aiheuttamien muodonmuutosten mittaamiseksi, kuva 45. Kuorman lisäys tapahtui hydraulisten tunkkien avulla ja aluslevyinä käytettiin leimautumisen estämiseksi $150 \times 250 \times 20$ mm³ metallilaattaa. Kiepahdustukien ja aluslevyjen aiheuttama lisäkuoma oli noin 0,14 kN (14,3 kg).

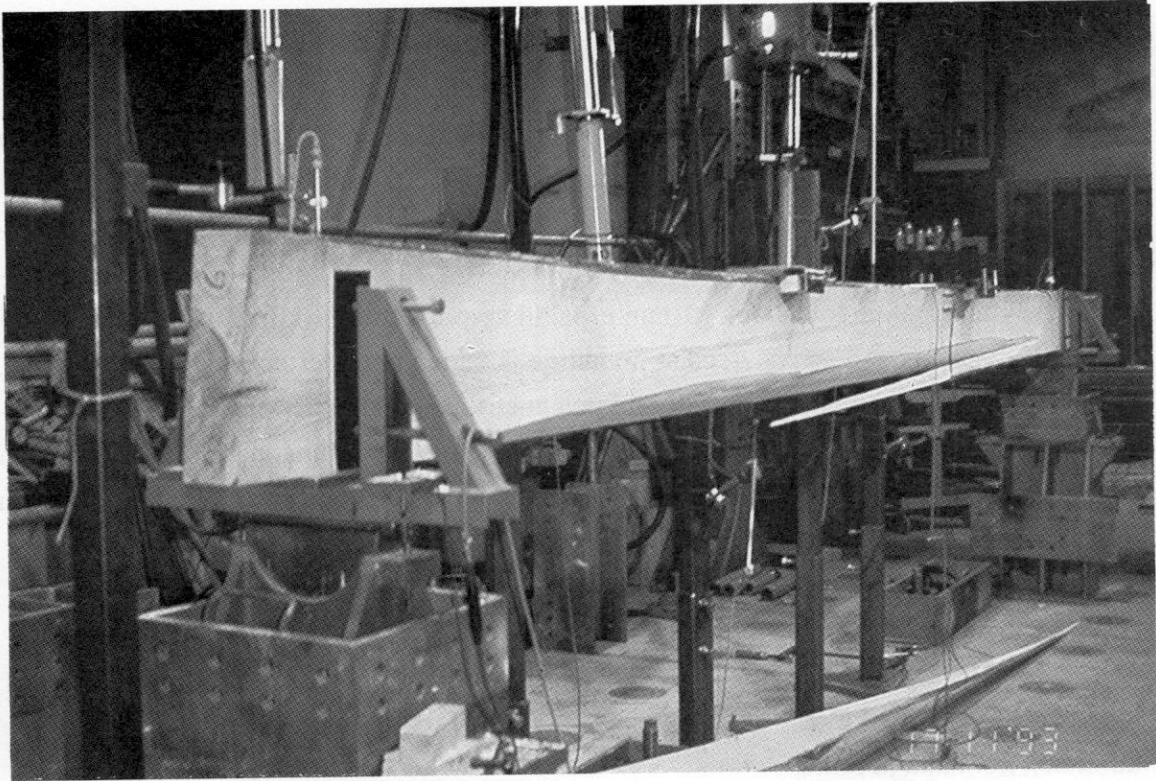
Kuva 42. Palkin siirtymien mitauspisteet.

Figure 42. The measurement points for measurement of deformation.

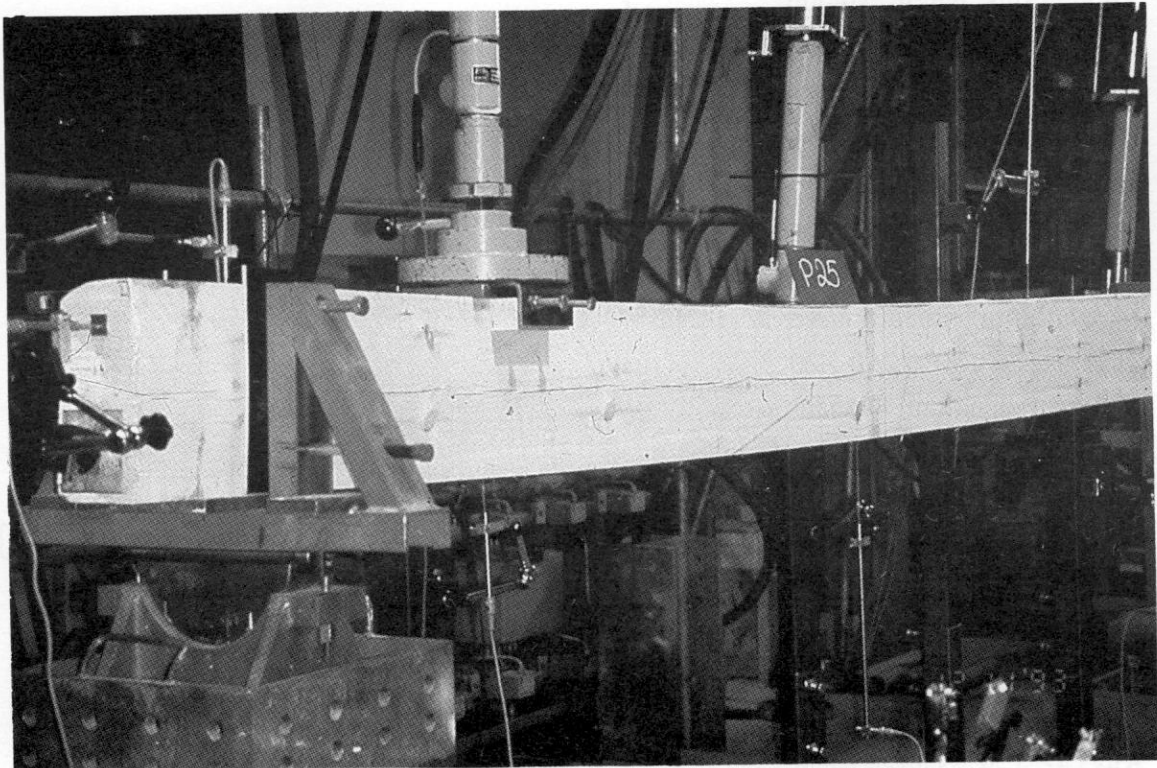


Kuva 41. Taivutus- ja leikkaukskokeiden kuormitusjärjestelyt.
Figure 41. The loads in the bending and shear tests.





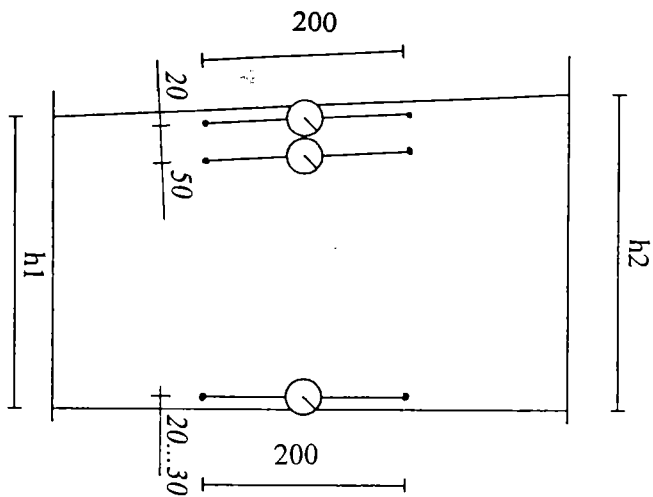
Kuva 43. Taivutuskoe.
Picture 43. The bending test



Kuva 44. Leikkauskoe.
Picture 44. The shear test

Kuva 45. Palkin puristus- ja veto-
vyöhykkeen muodonmuutosten mittaus-
järjestelyt.

Figure 45. The arrangement for mea-
surement in compression and tension
sides of the beam.



6.4.3 Kokeiden toteutus

Palkkeja kuormitettiin taivutuk-
sessa kahdella, jännevälän kol-
mannespisteissä sijaitsevilla piste-
kuormilla. Leikkauksessa kuormi-

tus suoritettiin yhdellä pistekuormalla, jonka etäisyys tuelta 0,6 m. Kuormien aiheuttamat taipumat mitattiin palkin keskeltä ja pistekuormien kohdalta. Tukien painumat mitattiin tuella palkin päältä. Kuormitus suoritettiin kuvassa 46 esitetyn kuormituskuvaajan /47/ mukaisesti voimaohjattuna ja kuormitusnopeutena käytettiin $Q_i/240$ s.

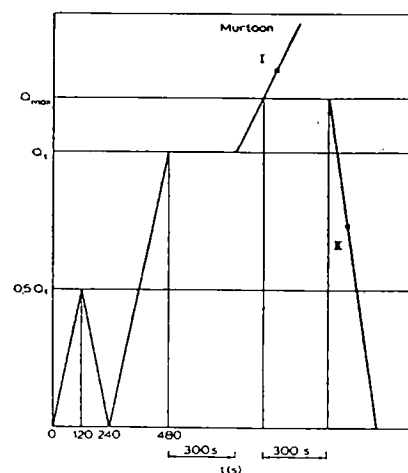
Kuormituksessa tarvittava ominaiskuorma Q_i ja rakenteelta vaadittava kuorma Q_{max} las-
kettiin koetta ennen suoritettua silmämääräisen lujuuslajittelun perusteella määritetyn lujuus-
luokan mukaan. Palkit 12, 14 ja 15 kuormitettiin arvoon Q_{max} asti ja kuormittamattomaan
tilaan palattiin käyrän II mukaisesti. Palkit 9, 11, 13, 16, 25, 26 ja 27 kuormitettiin käyrän
I mukaisesti murtoon. Taulukossa 3 on esitetty palkeille lasketut ominaiskuormat Q_i ja ra-
kenteelta vaadittavat kuormat Q_{max} leikkauksessa ja taulukossa 4 vastaavat arvot taivutuk-
sessa. Palkit, joille tehtiin sekä leikkaus- että taivutuskoe, kuormitettiin ensin leikkausmur-
toon ja sen jälkeen palkki vahvistettiin vanerilevyillä taivutuskoetta varten.

Palkeissa 13 ja 25 leikkausmurtokohta vahvistettiin vanerilevyillä taivutuskoetta varten.
Palkin 25 vanerivahvistus ei taivutuskokeessa toiminut täysin tarkoitetulla tavalla, sillä vah-
vistuksen pituus ei ollut riittävä ja vanerilevy kiertyi leikkausvoimien aiheuttamien palkin
ylä- ja alaosan liikkeiden mukaan. Palkit 9, 11, 13, 16, 25, 26 ja 27 kuormitettiin ensin

Taulukko 3. Palkkien ominaiskuormat ja vaadittavat kuormakes-
tävyudet leikkauksessa.

Table 3. The characteristic loads and ultimate loads for shear
tests.

Palkki nro Beam No.	Ominaiskuorma The characteristic load Q_i [kN]	Vertailu- kuorma The comparison load Q_{max} [kN]	Kuormitus- nopeus The change of the load [kN/min]
13	31,2	81,7	7,8
14	17,4	45,6	4,4
25	32,8	84,4	8,2



Kuva 46. Kuormitusaikataulu /47/.

Figure 46. The load curve for the test.

Taulukko 4. Palkkien ominaiskuormat ja vaadittavat kuormakestävyydet taivutuksessa.
Table 4. The characteristic loads and ultimate loads for bending tests.

Palkki nro Beam No.	Ominaiskuorma The characteristic load Q_c [kN]	Vertailukuorma The comparison load Q_{max} [kN]	Kuormitusnopeus The change of the load [kN/min]
9	12,8	33,6	3,2
11	11,6	30,3	2,9
12	9,5	25,0	2,4
13	11,7	30,7	2,9
14	5,6	14,6	1,8
15	5,4	14,1	5,4
16	5,0	13,1	1,8
25	12,8	33,5	3,2
26	7,3	19,1	1,8
27	7,2	18,9	1,8

puristusmurtoon, jonka jälkeen kuormaa kasvatettiin kunnes vetopuoli murtui. Palkki 15 kuormitettiin siten, että palkin puristuspuoli murtui, muuta vetopuolella ei murtoa tapahtunut. Murtoalueen korkeudeksi mitattiin 133 mm. Palkit 12 ja 14 kuormitettiin täysin kimmoisasti.

Kuormitetuista palkeista otettiin kappaleen korkuinen ja poikkileikkaukseltaan n. 50×50 mm² näyte, joka paloitiin 6...8 osaan. Palojen koko mitattiin ja kosteuspitoisuus määritettiin punnitus-kuivaus-punnitus-menetelmällä. Kuivien palojen koko mitattiin. Mittausten perusteella määritettiin palkkien kosteus koehetkellä sekä palkkien tiheys (liite L1).

Kuormitetuista taivutuspalkeista otettiin puristuspuolelta ehjäksi jääneestä osasta puristuskoekappaleet kyseisen palkin puhtaan puristuslujuuden määrittämiseksi. Puristuskoekappaleiden koot olivat $92 \times 92 \times 250$ mm³. Näytteitä säilytettiin noin viikon ajan huoneessa, jossa lämpötila oli +20 °C ja ilman suhteellinen kosteus 45 %. Kappaleet kuormitettiin hydraulisella puristimella, TONYlla. Muodonmuutos mitattiin 160 mm:n matkalta ja tuloksista piirrettiin jännitys-muodonmuutoskuvaajat, liite L5. Puristuskoekappaleiden kokeenaikainen kosteus, liite L5, määritettiin punnitus-kuivaus-punnitus-menetelmällä.

6.4.4 Tulosten käsittely

Kuormituksen aikana tapahtui leimautumista sekä tuella että tunkin alla olevien aluslevyjen kohdalla. Tukien painumat mitattiin palkin päälle sijoitetuilla antureilla.

Murtokuorman perusteella määritettiin koesarjalle ominaislujuudet lyhytaikaisessa kuormituksessa. Kimmomoduli E_f laskettiin standardin ASTM D 198 mukaisesti, kaava (4). Standardin mukaan määritettiin myös leikkauskorjattu kimmomoduli E_G , kaava (5) ja liukumoduli G , kaava (6). Kaavoissa käytettävät kuormien ja siirtymien arvot määritettiin voima-siirtymäkäyrän kimmoiselta alueelta, kohtien 10 % ja 40 % murtokuormasta erotuksena.

$$E_f = \frac{Fa}{24Iw_o} [3L^2 - 4a^2] \quad (4)$$

$$E_G = \frac{Ml^2}{8Iw_l} \quad (5)$$

$$G = \frac{2FL}{10bh \left[w_o - \frac{23L^2}{27l^2} w_l \right]} \quad (6)$$

$$l \approx L - 2a - 2h$$

E_f = kimmomoduli [MPa]

E_G = leikkauskorjattu kimmomoduli [MPa]

G = liukumoduli [MPa]

I = palkin jäyhyysmomentti [m⁴]

L = palkin jänneväli [m]

M = momentti kuormasta F [MNm]

F = kuorma [MN]

a = pistekuorman etäisyys tuelta [m]

b = palkin poikkileikkauksen leveys [m]

h = palkin poikkileikkauksen korkeus [m]

l = jänneväli, jota käytetään leikkauskorjattujen muodonmuutosten mittaukseen [m]

w_o = palkin taipuma neutraaliakselilla tuen ja keskikohdan välillä kuormasta

F (tukien painumat on huomioitu) [m]

w_l = taipuma jännevälillä l [m]

Palkkien ja kiilapalkkien taivutusjännitys laskettiin kaavan (7) avulla. Kiilapalkissa kappaleen korkeus muuttuu pituuden funktiona. Kiilapalkissa kiilamainen muoto aiheuttaa palkin yläreunassa jännityksen alenemisen, kaava (8), ja alareunassa jännitys vastaavasti kasvaa, kaava (9). Maksimijännityksen kohdalla ero oli suurimmillaan kuitenkin vain 0,08 % verrattuna kaavan (7) avulla laskettuun arvoon, joten muodon aiheuttamaa lisäystä jännityksen arvoon ei laskelmissa otettu huomioon.

$$\sigma_b = \frac{M}{W} \quad (7)$$

$$\sigma_{vr} = \frac{M}{W} (1 - \tan^2 \alpha) \quad (8)$$

$$\sigma_{ar} = \frac{M}{W} (1 + 4 \tan^2 \alpha) \quad (9)$$

- M = momentti [MNm]
 W = poikkileikkauksen taivutusvastus [m³]
 σ_{ar} = jännitys alareunassa [MPa]
 σ_{vr} = jännitys yläreunassa [MPa]
 α = palkin yläreunan ja vaakatason välinen kulma

Suhteellinen muodonmuutos on määritetty palkin keskiosan eli kuormituspisteiden ja jännevälin keskikohdan taipumien avulla. Suhteellinen muodonmuutos ε_x lasketaan kaavasta (10).

$$\varepsilon_x = \varepsilon_o + ky \quad (10)$$

- ε_x = suhteellinen muodonmuutos
 ε_o = alkusiirtymä
 k = kerroin
 y = taipuma

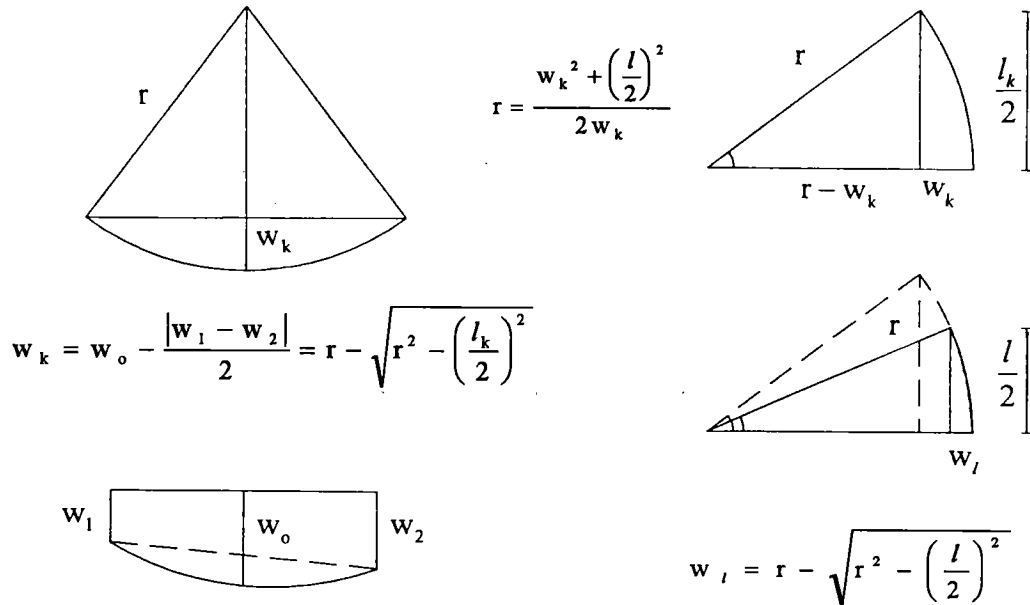
Alkusiirtymä $\varepsilon_o = 0$. Tekijä $k = 1/\rho$, jossa ρ on kaarevuussäde ($1/\rho = 1/r$). Kuvassa 47 on esitetty kaarevuussäteen määrittäminen sekä taipumasuureiden laskenta eri tapauksissa.

Palkin leikkausjännitys τ on laskettu kaavan 11 avulla.

$$\tau = \frac{3Q}{2A} \quad (11)$$

- τ = leikkausjännitys [MPa]
 Q = leikkausvoima [MN]
 A = poikkileikkauksen pinta-ala [mm²]

$$r^2 = \left(\frac{l}{2}\right)^2 + (r - w_k)^2$$



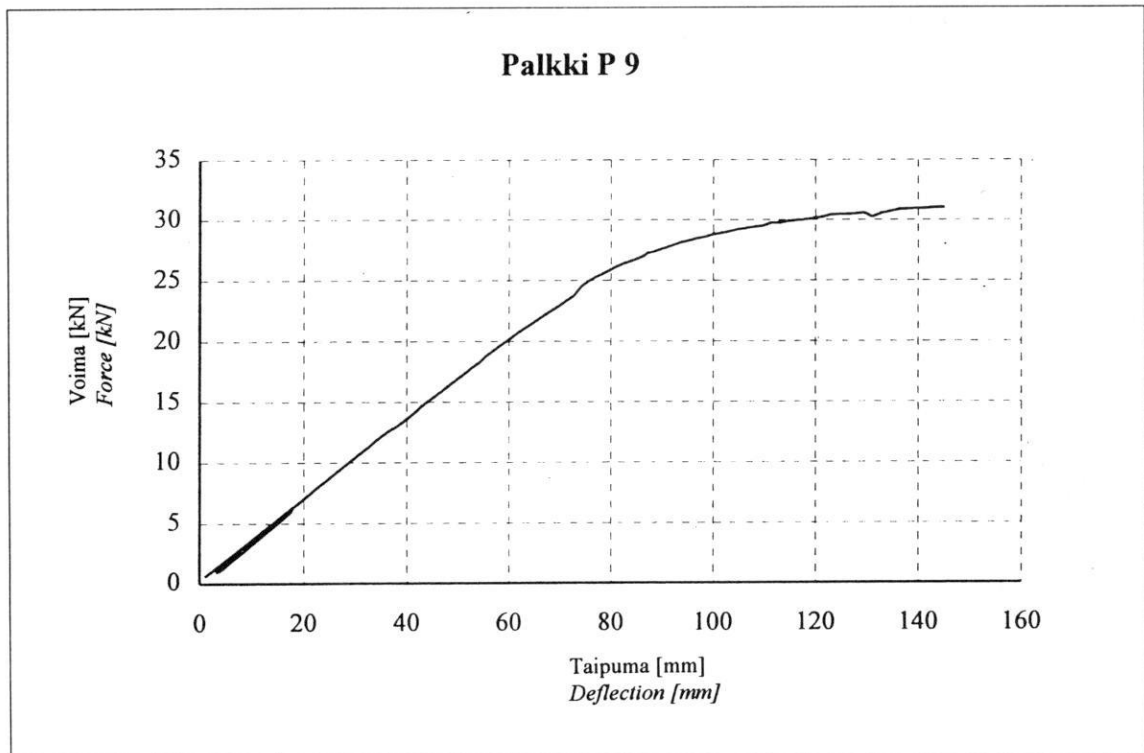
- l = leikkausmuodonmuutoksista vapaa jänneväli
 l_k = kuormituspisteiden väli
 r = kaarevuussäde
 w_k = kuormituspisteiden välisen alueen taipuma
 w_l = taipuma jännevälillä l
 w_0 = palkin taipuma keskipisteen ja tuen välillä
 w_1, w_2 = palkin taipuma kuormituspisteiden kohdalla

Kuva 47. Kaarevuussäteen määrittäminen.

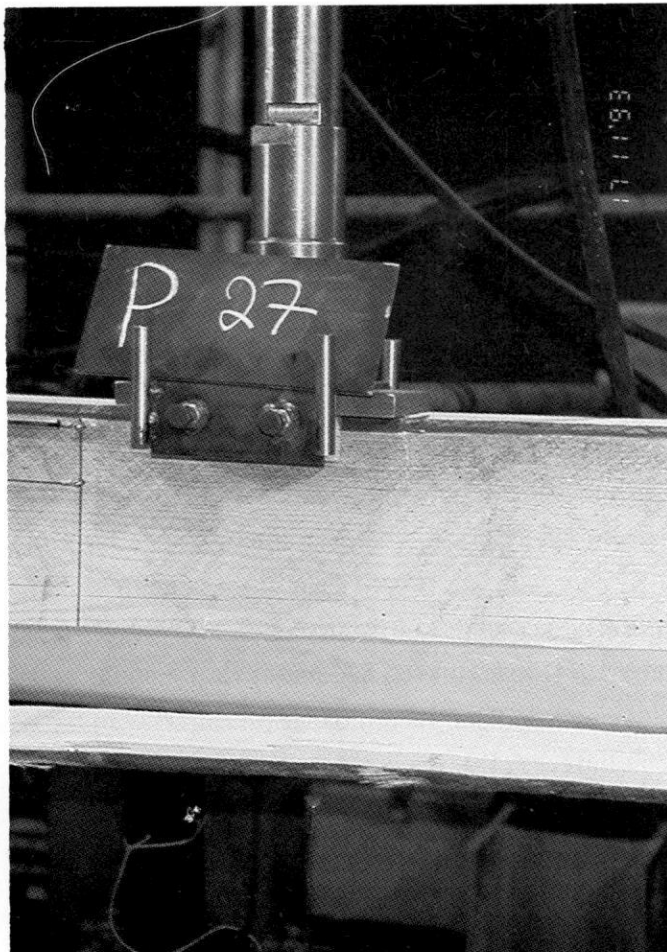
Figure 47. The determination of curvature radius

6.4.5 Lujuuskokeiden tulokset

Koekappaleiden murtotapa oli sitkeä, plastinen. Kuvassa 48 on esitetty tyypillinen voima-taipumakuvaaja. Palkit murtuivat ensin puristuspuoleltaan, syiden nurjahtaessa. Yleensä puristusmurto tapahtui kohdassa, jossa oli syyhäiriö. Syyhäiriön aiheutti oksa tai tunkin aluslevyn reunan painautuminen puun sisään. Kun kuormaa kasvatettiin ja neutraaliakseli laskeutui alemmas, alareunan vetolujuus ylittyi ja palkki murtui. Kuvassa 49 näkyvät palkin yläosan puristusrypyt sekä alaosan vetomurto. Kuormituksen aikana tapahtui leimautumista sekä tuella että tunkin alla olevien aluslevyjen kohdalla. Koetulokset on esitetty taulukossa 5. Palkkien voima-taipumakuvaajat ovat liitteessä L9.



Kuva 48. Palkin voima-taipumakuvaaja.
Figure 48. The force and deflection curve.



Kuva 49. Taivutuspalkin murto.
Figure 49. The failure of the beam in the bending test.

Taulukko 5. Lujuuskokeiden tulokset. Kosteusluokka 3 ja aikaluokka C.
Table 5. The results of the strength tests.

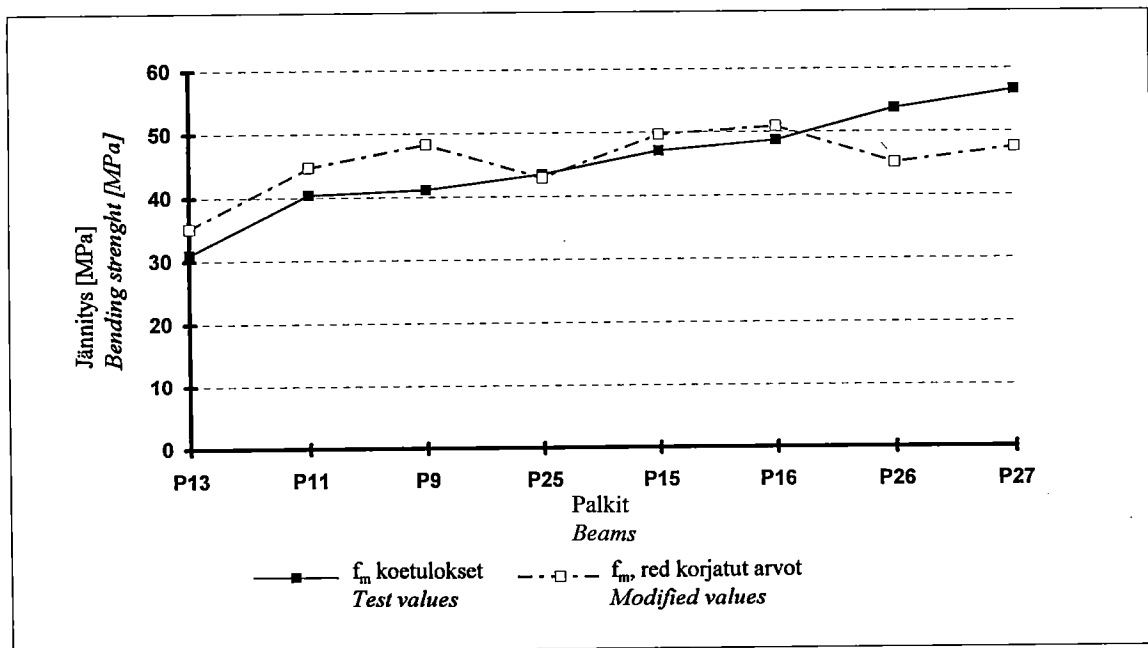
Koekappale nro Specimen	Puulaji Wood	Palkki malli Beam type		Leveys Width [mm]	Korkeus Height [mm]	Kosteus Moisture [%]	Koe - tiheys Density [kg/m ³]	Murtokuorma Load of rupture		Taivutusjännitys MOR		Leikkausjännitys Shear strength [MPa]
								F _m [kN]	F _{p,est} [kN]	Murto [MPa]	Plast,est [MPa]	
P9	Kuusi Spruce	Suora Straight	Taivutus Bending	102	298	22,8	432	31,07	24,49	41,16	32,44	4,39
P11	Kuusi Spruce	Suora Straight	Taivutus Bending	98	299	21,8	428	29,53	23,05	40,44	31,57	
P12	Kuusi Spruce	Suora Straight	Kimm.taiv	146	279	22,8	442	24,94	---			
P13	Kuusi Spruce	Suora Straight	Taivutus	146	303	22,3	441	34,68	26,34	31,05	23,58	
			leikkaus	152	300	22,3	441	133,36	---			
P14	Kuusi Spruce	Suora Straight	Kimm.taiv	101	255	21,3	448	14,55	---			
			leikkaus	100	252	21,3	448	78,66	---			
P15	Kuusi Spruce	Kiila Wedge	Taivutus Bending	99	290	21,4	444	32,67	25,43	47,09	36,66	
P16	Kuusi Spruce	Kiila Wedge	Taivutus	102	279	21,4	447	32,22	24,75	48,70	37,41	
			Bending									
P25	Mänty Pine	Suora Straight	Taivutus	125	278	21,5	523	35,03	26,85	43,51	33,36	
			leikkaus	124	278	21,5	523	135,13	---			
P26	Mänty Pine	Kiila Wedge	Taivutus Bending	101	312	20	598	44,03	33,65	53,74	41,08	
P27	Mänty Pine	Kiila Wedge	Taivutus Bending	101	310	20	598	45,80	35,01	56,63	43,29	

Taulukko 6. Lujuuskokeiden perusteella lasketut ominaisarvot aikaluokassa C.
Table 6. The characteristic values calculated on the basis of the tests.

Koekappale nro Specimen	Taivutus Bending		Leikkaus Shear	Kimmomoduli Modulus of elasticity		
	f _m koetulokset [MPa]	f _{redm} korjattu arvo [MPa]	f _m koetulokset [MPa]	E _f kaikki [MPa]	E _f suorakaide [MPa]	E _G [MPa]
P9	41,16	48,30		11759	11759	10072
P11	40,44	44,71		12161	12161	10030
P12				10033	10033	7603
P13	31,05	35,14		9012	9012	7710
"-"			4,39			
P14				10823	10823	8260
"-"			4,68			
P15	47,09	49,68		11836		9534
P16	48,70	50,94		11467		8904
P25	43,51	42,90		12424	12424	10746
"-"			5,88			
P26	53,74	45,14		12645		10129
P27	56,63	47,57		12372		11925
Keskiarvo Mean value	45,28848	45,54754	4,982962	11453,2	11035,33	9491,3
Keskihajonta Standard deviation	8,117118	4,983727	0,790722	1170,082	1575,25	1244,102
v	0,179231	0,109418	0,158685	0,102162	0,142746	0,131078
Ominaisarvo Characteristic value	26,94379	34,28432	2,848011	8996	7223	6879

Koetulosten perusteella laskettiin taivutuslujuudelle sekä kimmo- ja liukumodulille ominaisarvot, taulukko 6. Taulukossa on esitetty koetuloksista laskettujen arvojen lisäksi taivutuslujuuden tiheys- ja kosteuskorjatut arvot.

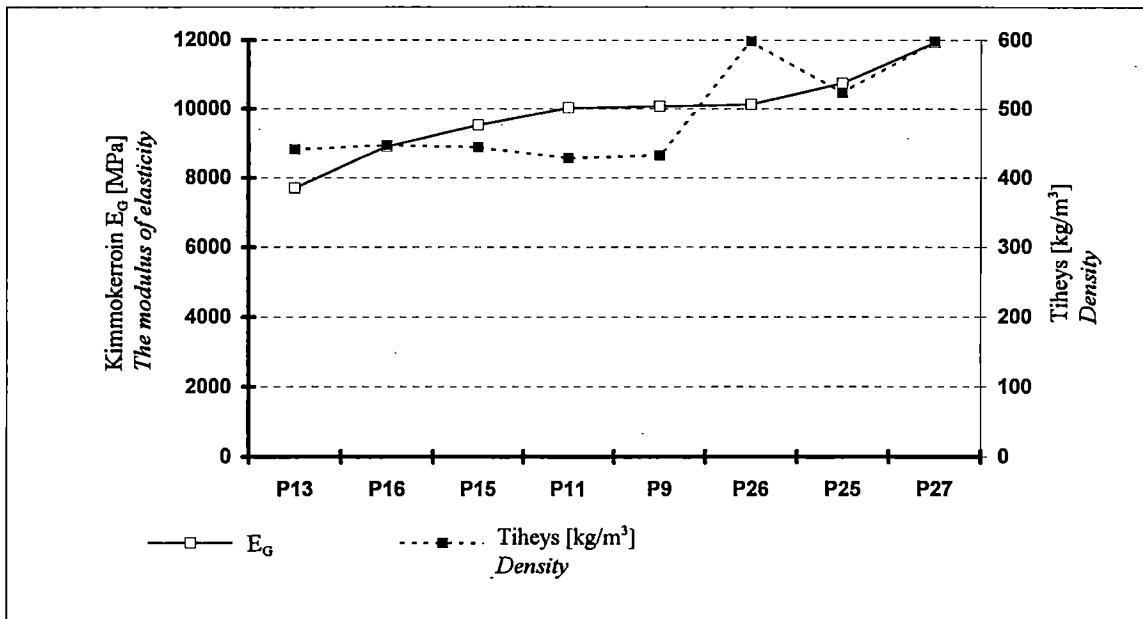
Koekappaleiden taivutuslujuuden keskiarvo oli 45,3 MPa ja keskihajonta 8,1 MPa. Koetulosten perusteella taivutuslujuuden ominaisarvo f_{bk} kosteusluokassa 3 ja aikaluokassa C on 26,9 MPa. Taivutuslujuuden tiheys- ja kosteuskorjatuksi ominaisarvoksi saatiin 34,3 MPa. Tiheyden vertailuarvona käytettiin T30-luokan vaatimuksia ja kosteuden 15 %. Suurimmaksi osaksi taivutuslujuuden ominaisarvon paraneminen korjauskäsittelyn perusteella johtuu hajonnan pienenemisestä. Suorakaidepalkeille (6 kpl) kimmomodulin ominaisarvoksi E_f kosteusluokassa 3 ja aikaluokassa C saatiin 7223 MPa. Jos kimmomoduli lasketaan kaikkien kuormitettujen palkkien perusteella (10 kpl) saadaan ominaisarvoksi 8996 MPa. Ominaisarvojen eroon vaikuttaa eniten koekappaleiden määrä ja koetulosten hajonta. Leikkauskorjatun kimmomodulin E_G ominaisarvoksi tulee 6879 MPa. Leikkauslujuuden ominaisarvoksi saadaan koetulosten perusteella 2,8 MPa. Kuvassa 50 esitetään taivutuslujuuksien koetuloksien lisäksi niistä laskettujen kosteus- ja tiheyskorjattujen ljuuksien arvot. Kuvasta nähdään, että vertailutasona oleva taivutuslujuuden f_{bk} arvo 23 MPa aikaluokassa C ja kosteusluokassa 3 ylitetään selvästi. Kimmomodulin E_G koetulokset ja palkkien tiheydet on esitetty kuvassa 51. Ljuuskokeiden tulokset ja laskelmat kaavoineen on esitetty liitteessä L12.



Kuva 50. Taivutuslujuus f_m (MPa) kosteusluokassa 3 ja aikaluokassa C sekä kosteus ja tiheys korjatut arvot f_m , red.

Figure 50. The bending strengths the tests and as values modified to correspond to 15% moisture content.

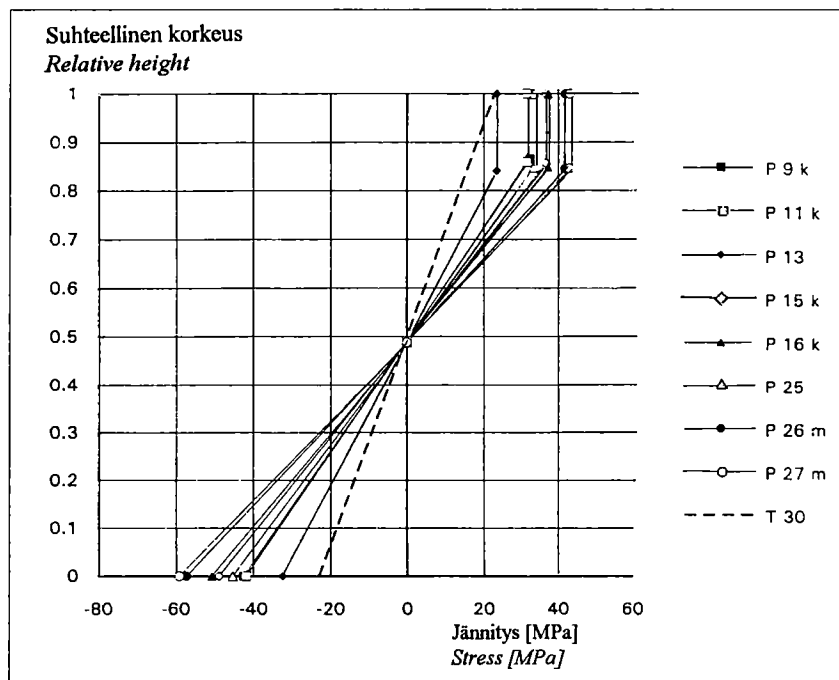
Murtolujuuden lisäksi koetuloksista määritettiin kahden suoran menetelmällä plastisoitumispiste, liite L10. Kimmoisella alueella suora määritettiin 10 % ja 40 % arvojen perusteella. Plastisella alueella suora on määritetty 80 % ja murtokuorman perusteella. Plastisen murron



Kuva 51. Kimmokerroin E_G (MPa) kosteusluokassa 3 ja aikaluokassa C ja koekappaleiden tiheydet.
Figure 51. The modulus of elasticity E_G as measured in the tests and density of the specimen.

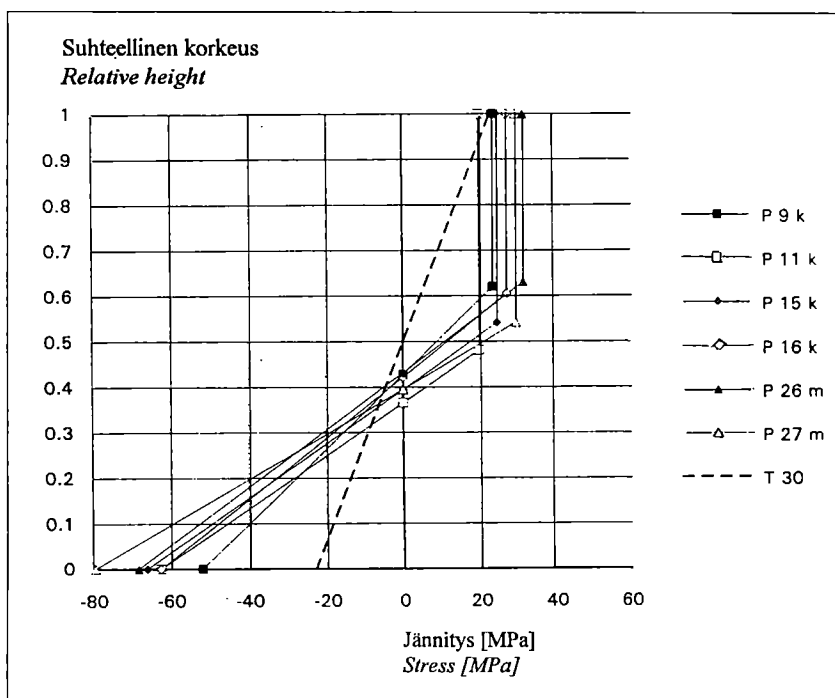
arvoa käytettiin palkin puristuspuunnan murtolujuutena ja osittain plastisoituneen poikkileikkauksen jännitysjaakama murtohetkellä laskettiin tätä arvoa käyttäen. Vetojännityksen arvoa ja neutraaliakselin paikkaa muuttamalla haettiin sellainen puristuspuunnan korkeus, jolla sekä sisäisten että ulkoisten voimien aiheuttama taivutusjännitys oli yhtä suuri. Jännitysjaakama on esitetty kuvassa 52. Jännitysten laskenta on esitetty tarkemmin liitteessä L11.

Kun määritetään poikkileikkauksen jännitysjaakama havaitun puristuspuunnan korkeuden perusteella eli plastisoituneen puristusvyöhykkeen korkeudeksi otetaan kappaleesta mitattu puristusryppyjä sisältävä alue, saadaan murtohetken jännitysjaakamaksi kuvan 53 tapaus. Tällöin laskennassa haetaan momenttien tasapainoa muuttamalla neutraaliakselin paikkaa sekä puristus- että vetojänn-



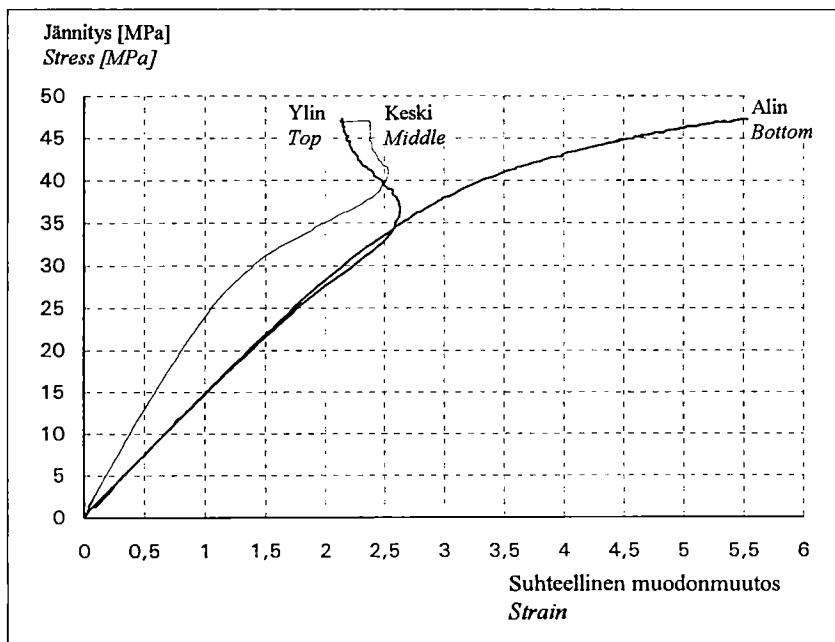
Kuva 52. Poikkileikkauksen jännitysjaakama murtohetkellä. Plastisoitumispuiste arvioidaan kahden suoran menetelmällä. Kosteusluokka 3, $u < 23\%$.

Figure 52. The stresses of the beam according to the elastic-plastic model, when the height of the compression plastic zone is determined by the two-line method. Moisture class is 3, $u < 23\%$,



Kuva 53. Poikkileikkauksen jännitysjaakama murtohetkellä, kun puristusvyöhykkeen korkeus on määritetty mitatun murtopinnan korkeuden perusteella.

Figure 53. The stresses of the beam by elastic-plastic model, when the height of the compression plastic zone is determined by the height of measured failure zone. Moisture class is 3, $u < 23\%$.



Kuva 54. Palkin puristuma ja venymä palkin jännityksen kasvaessa. Kosteusluokka 3, $u < 23\%$. Tuloksiin ei ole tehty tiheyskorjausta.

Figure 54. A stress-strain curve of a beam.

siirtymäkuvaaja. Kuvasta nähdään, että kahden puristusvyöhykkeellä sijaitsevan anturin siirtymä pienenee kun lähestytään palkin taivutusmurtojännitystä. Käännekohta sijoittuu hyvin aikaisemmin määritetyn plastisen murtojännityksen kohdalle, jossa siis puristuspuoli

nityksen arvoa. Tuloksien tulkinnassa on huomattava, että puristuspuolelta on pystytty mittaamaan vasta vetolujuuden ylittymisen jälkeen. Murtohetken jälkeen syntyneiden lisämuodonmuutosten suuruudesta ei ole tietoa. Kuvasta 53 nähdään, että näin olettaen puristusvyöhykkeen korkeuden hajonta on huomattavasti suurempi kuin kuvan 52 tapauksessa ja vetolujuuden arvot kasvavat noin 20 MPa.

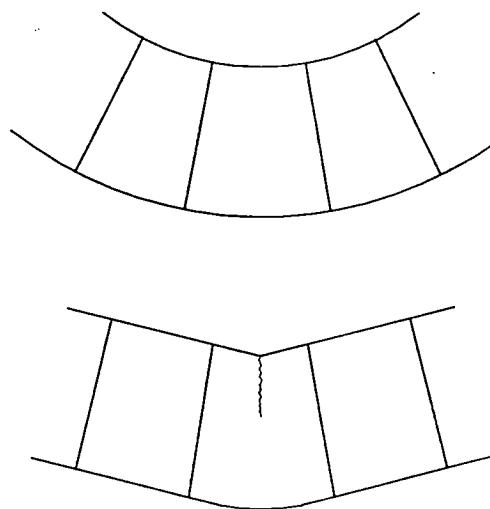
Palkkien sivuun kiinnitettyjen antureiden avulla seurattiin palkin puristus- ja vetovähykkeen käyttäytymistä. Mittauspiste oli sijoitettu mahdollisimman lähelle kiilapalkin laskettua murtokohtaa eli kohtaa, jossa pistekuorman kohdalla poikkileikkauksen korkeus oli pienin. Kuvassa 54 on esitetty palkin nro 16 vaakasuuntainen jännitys-suhteellinen

alkaa myötää. Ilmiö on merkittävin palkissa nro 16. Pistekuorman aluslevyn reunan aiheuttama puristusmurto on vain noin 75 mm:n päässä antureiden kiinnityspisteistä, kun taas palkilla 26 noin 325 mm ja palkilla 27 noin 305 mm etäisyydellä.

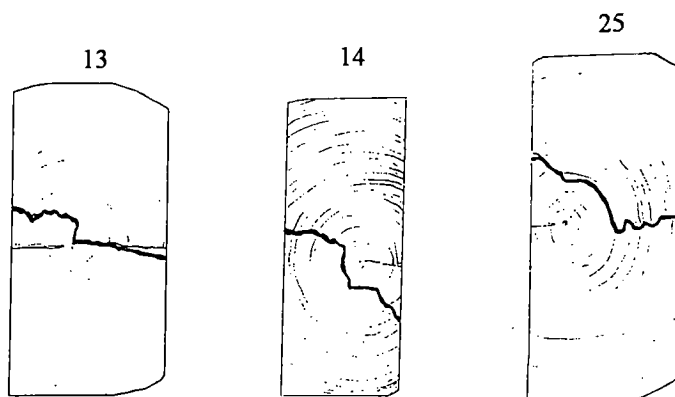
Aluslevyn reunan painuminen puuhun venyttää murtokohtaa ja aiheuttaa muutoksen siirtymämittaukseen. Mitä kauemmas murtokohdasta mennään, sitä vähemmän ilmiö vaikuttaa. Saman suuntainen merkitys on myös sillä, että ehjän poikkileikkauksen puristuma taivutuksessa kasvaa koko ajan, kunnes puristuslujuus ylittyy ja muodostuu selvä epäjatkuvuuskohta, kuva 55. Muodonmuutosten keskittyminen yhteen paikkaan vähentää lähialueen puristumaa.

Kuva 55. Palkin puristuma ennen ja jälkeen plastisoituspisteen.

Figure 55. The deformations of a beam before and after the yield state.



Leikkauskuormituskokeissa murtotapa oli hauras. Kokeissa kuivumishalkeamilla ei havaittu olevan vaikutusta leikkauslujuuteen, kapasiteetti oli laskettu täydellä poikkileikkauksella ja murtokuorma oli yli kaksinkertainen. Lisäksi havaittiin, että leikkaushalkeilu ei noudattanut kuivumishalkeilua, se poikkesi lähellä puun pintaa kuivumishalkeamasta ja eteni vuosilustoa myöten seuraten myös muita puun vikoja. Kuvassa 56 on esitetty palkkien leikkausmurtotavat.



Kuva 56. Palkin leikkausmurto.

Figure 56. Some shear failure cases of the test beams.

Bruttopoikkileikkauksen perusteella määritetyn leikkauslujuuden ominaisarvoksi f_{vk} saatiin 3,2 MPa, taulukko 6. Jos leikkauslujuusarvot määritetään ehjälle poikkileikkaukselle, saadaan keskiarvoksi 7,6 MPa, hajonnaksi 2,5 MPa ja leikkauslujuuden ominaisarvoksi 1,9 MPa. Vaikka ehjälle poikkileikkaukselle laskettujen leikkauslujuuksien keskiarvo on yli

puolitoistakertainen bruttopoikkileikkaukselle laskettuun verrattuna, aiheuttaa suuri hajonta ja koekappaleiden pieni määrä sen, että ominaislujuuden arvo on enää alle puolet bruttopoikkileikkaukselle laskettuun verrattuna.

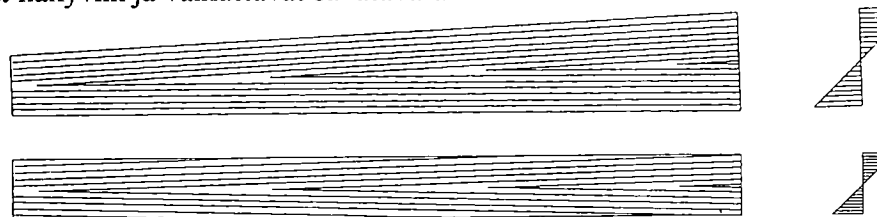
6.4.6 Järeän sahatavaran lujuus

Murtotapa taivutuskokeessa oli plastinen, eli puun puristuslujuus oli määräävä. Tämä on tyypillistä märälle puutavaralle (koekappaleiden kosteudet 21,4 - 22,8 %). Vinosyisyys ei ollut koekappaleissa merkittävää. Lujuuskokeiden perusteella järeiden lankkujen lyhytaikaislujuus on suuri. Koetuloksista laskettu taivutuslujuuden ominaisarvo f_{bk} on 26,9 MPa. Tiheys- ja kosteuskorjatuksi taivutuslujuuden ominaisarvoksi saadaan 34,3 MPa. Kaikkien kuormitettujen palkkien perusteella kimmomodulin E_f ominaisarvoksi kosteusluokassa 3 ja aikaluokassa C saadaan 9000 MPa.

Kuivumisen vaikutus puristuslujuuteen on suurempi kuin vetolujuuteen. Kun taivutuskappaleen puristuskestävyys paranee, neutraaliakseli siirtyy alaspäin hitaammin ja vetojännityksen kasvu kappaleen vedetyllä vyöhykkeellä hidastuu. Tällä perusteella on odotettavissa, että ilma-kuivan järeän sahatavaran taivutuslujuuden ominaisarvo paranee verrattuna koetuloksiin, kuten tiheys- ja kosteuskorjaus osoitti. Kimmomodulin arvo paranee noin 10 % kun puun kuivuu koekosteudesta 15 %:iin.

Leikkauskuormituskokeissa murtotapa oli hauras. Kosteuden vaikutus leikkauslujuuteen on vähäinen. Yleensä oletetaan leikkauslujuuden heikkenevän siten, että läpihaljenneella poikkileikkauksella ei enää ole leikkauskapasiteettia. Kuivumishalkeilun vaikutusta lyhytaikaiseen leikkauslujuuteen ei kokeilla pystytty selvittämään. Leikkausmurtopinta ei noudattanut kuivumishalkeilua, vaan kiersi kappaleen sisään jääneen ytimen. Brutto-poikkileikkauksen perusteella määritetyn leikkauslujuuden ominaisarvoksi f_{vk} saatiin 2,8 MPa.

Koetulosten perusteella yli 100 mm leveiden ja 250 mm korkeiden järeiden lankkujen lujuusluokka on T30. Pienen koekappalemäärän perusteella ei voi tehdä varmoja johtopäätöksiä, mutta tässä tapauksessa koekappaleiden sahatavaraluokituksen mukaan määritetty lujuusluokka jäi liian alhaiseksi. Madsen havaitsi, että leveyden kasvaessa puun virheiden vaikutus pieneni. Tämä virheen merkityksen pieneneminen kuormitetussa poikkileikkauksessa on todennäköinen syy lujuuden kasvuun. Myös se, että kiilamaisen palkin sahauskassa puun syyt säilyvät ehyempinä, kuva 57, vaikuttaa edullisesti palkin lujuuteen. Järeässä sahatavarassa osa tukin sisäöksistä jää kappaleen sisälle eikä juurikaan vaikuta sen lujuuteen. Sen sijaan normaalissa sahatavarassa tukki pilkotaan niin pieniin osiin, että kaikki oksat tulevat näkyviin ja vaikuttavat sahatavaran laatuun.



Kuva 57. Syiden suunta kiilamaisessa palkissa.

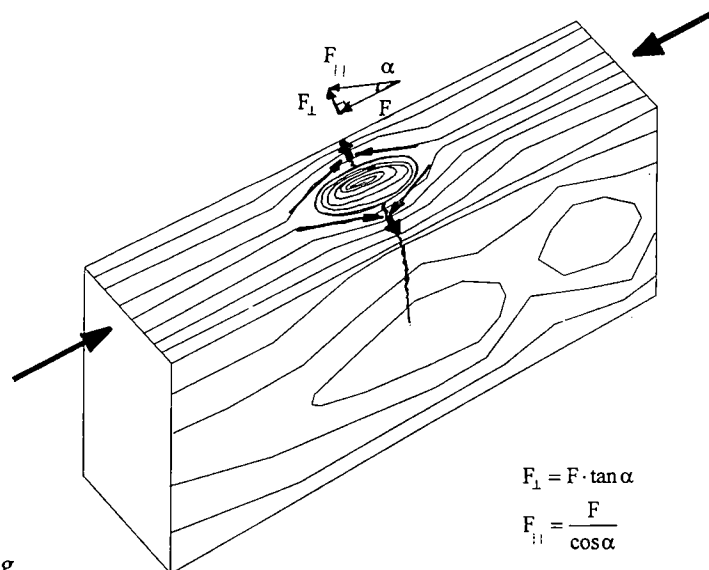
Figure 57. The grain directions in a wedged beam.

Koekappaleiden lukumäärän tulisi olla mahdollisimman suuri, että koetulosten välisen hajonnan vaikutus jäisi pieneksi. Tämän vuoksi materiaalien lujuusominaisuudet on yleensä testattu käyttäen pieniä ja usein virheetömiä koekappaleita. Vikojen vaikutuksia sahatavaran lujuuteen tutkittaessa on käytetty vain pieniä koekappaleita. Madsen käsittelee /32/ jonkin verran kokovaikutusta ja sahatavarassa esiintyvien vikojen vaikutusta järeän sahatavaran lujuusominaisuuksiin. Huomattavaa on, että kokovaikutusta tutkittiin sahatavarasta, jonka leveys oli 38 mm. Tällöin poikkileikkauksen tai jännevälin kasvattaminen heikensi kappaleen lujuutta, kuten Weibullin teoria olettaa. Poikkileikkauksen kasvaessa suomalaisten mittojen mukaan normaalia leveämmäksi sen sijaan Madsenin tulosten perusteella poikkileikkauksen pinta-alan tai jännevälin kasvaessa lujuus kasvaa. Poikkileikkauksen tilavuuden kasvu ei siis automaattisesti heikennä taivutuslujuutta, vaan määräävä ominaisuus on poikkileikkauksen leveys.

6.4.7 Järeän sahatavaran murtomekanismit

Rakenteissa käytettävää puutavaraa voidaan kuvata sarjalla, jonka heikoimman osan muodostaa luokka T18 ja vahvimman virheetön puu. Materiaali on jaettu eri lujuusluokkiin, joissa jokaisessa lujuus vaihtelee tiettyjen rajojen sisällä. Taivutuksessa heikolla materiaalilla on yksi murtotapa, vetolujuuden ylittyminen. Se liittyy joko paikalliseen vinosyisyyteen reunoissa tai oksien aiheuttamaan jännityskertymään syissä oksan molemmilla puolilla, sillä oksa ei pysty välittämään voimia ja käyttäytyy kuten reikä. Luja materiaali murtuu puristuspuolelta siten, että syntyy "puristusryppyjä". Näiden välissä on yhdistettyjen murtotapojen alue.

Virheetömässä, taivutetussa sauvassa jännityksen lähestyessä puun puristuslujuutta syyt nurjahtavat sauvan puristuspuolella. Normaalisissa puutavarassa syiden nurjahduksen yleensä aiheuttaa paikallinen vika, esim. oksan ympäristön tai liittyvän rakenneosan leimautumisen aiheuttama vinosyisyys. Puristusmurron periaate on esitetty kuvassa 58.

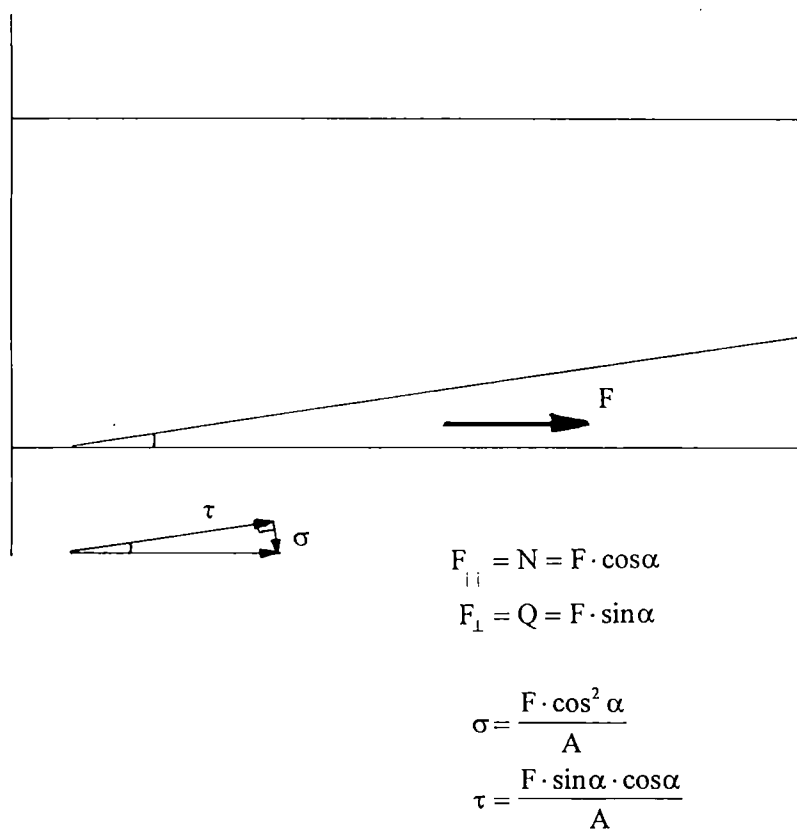


Kuva 58. Puun syiden nurjahdaminen.
Figure 58. Compression failure, buckling of fibres beside a knot for compression and perpendicular tension.

$$F_{\perp} = F \cdot \tan \alpha$$

$$F_{||} = \frac{F}{\cos \alpha}$$

Kappaleen vinosyisyys merkitsee sitä, että puun syyt ovat tietyssä kulmassa kuormitus-suuntaa vastaan ja syiden väliin muodostuu poikkitaista kuormitusta. Koska puun veto- ja puristuslujuus syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa on vain murto-osa verrattuna syiden suuntaan, niin kappaleen lujuus pienenee vinosyisyyden vaikutuksesta. Oksan ympäristöön muodostuu aina vinosyisyyttä ja lisäksi vedossa oksan aiheuttama poikkileikkauksen pienentyminen aiheuttaa jäljelle jääneessä poikkileikkauksessa jännityksen kasvun. Tämän vuoksi murtokohta vetokappaleissa tai taivutetun sauvan vetovyöhykkeellä usein sijoittuu oksan välittömään läheisyyteen. Vinosyisyyden aiheuttaman kuormituksen periaate on esitetty kuvassa 59.



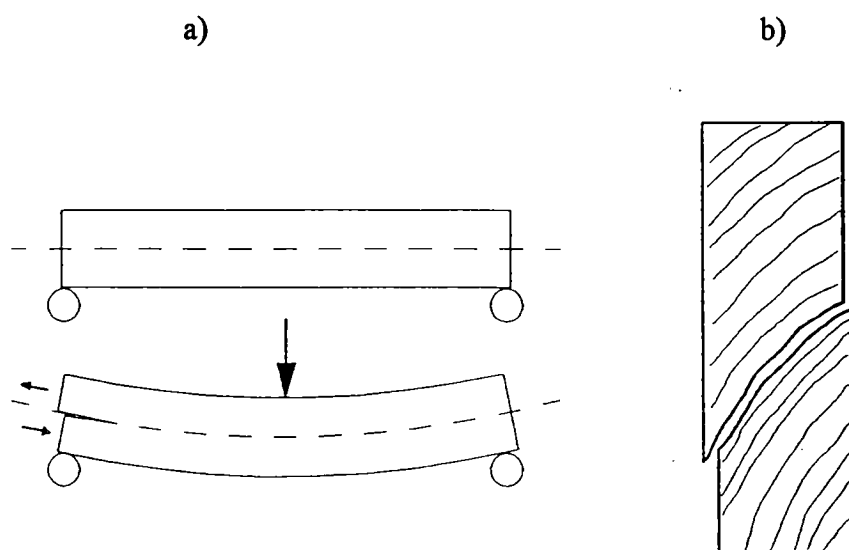
Kuva 59. Vinosyisyyden vaikutus.

Figure 59. The effect of sloping grain direction causes shear and perpendicular tension stress.

Leikkausmurrossa on kolme murtumistapaa. Perinteinen leikkausmurto on tapaus, jossa palkin yläpuolisko liukuu suhteessa alaosaan, kuva 60a. Todellisuudessa on erittäin vaikeaa saada poikkileikkaukseltaan suorakaiteen muotoinen puutavara murtumaan tällä tavoin. Toisessa tapauksessa oletetaan, että palkissa on päätyhalkeama. Tässä tapauksessa jännityksen intensiteettitekijä ja leikkausjännityksen suuruus määräävät murtotyypin. Murtotapa on saman näköinen kuin edelläkin, mutta se edellyttää halkeamaa, jonka on aiheuttanut syitä vastaan kohtisuoran vetolujuuden ylittyminen esim. kutistumisen seurauksena.

Murtotyyppi esiintyy melko alhaisella jännitystasolla, riippuen siitä miten syvä halkeama on. Kolmas murtotapa on ns. "rolling shear", jossa murtopinnat seuraavat vuosilustoja, kuva 60b. Murtotyyppi esiintyy leikkaus- ja tukivoimien aiheuttamien suurten jännitysten yhteydessä erityisesti naulalevyristikoita käytettäessä. /32/

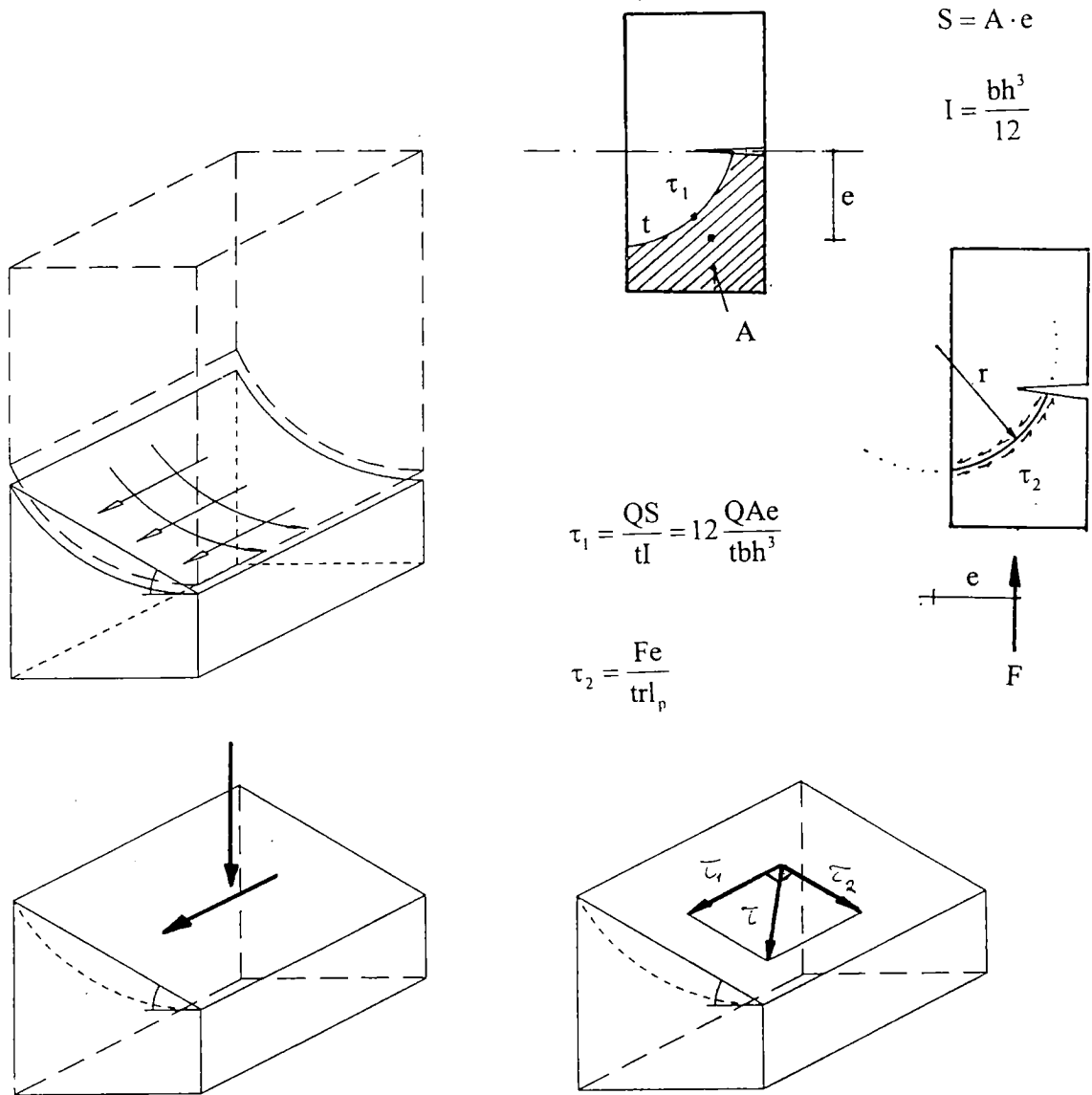
Perinteinen leikkausmurto on harvinainen, sillä usein määräävin murtotapa on taivutus, leimautuminen tai liukupinnan syntyminen vuosirenkaita myöten. Madsenin mukaan liimapuupalkeissa, joissa on lyhyt jänneväli ja pieni L/h-suhde, eivät täysmittakaavakokeissa tapahtuvat leikkausmurrot kuitenkaan ole harvinaisia /32/. Palkeissa, joissa kuorma on lähellä palkin päätä ja palkin sivusuhte (h/b) on korkea, voi murto tapahtua siten, että halkeama syntyy vuosirenkaiden väliin eli syntyy ns. "rolling shear" -murtumana. Erityisesti tapauksissa, joissa vuosirenkaat alkavat toiselta lappeelta ja etenevät toiselle lappeelle siten, että kulma on n. 45°. /32/



- a) Tavallinen leikkausmurto
Ordinary case
 b) Ns. "rolling shear"

Kuva 60. Leikkausmurto.
Figure 60. Shear failures, a) ordinary case b) rolling shear

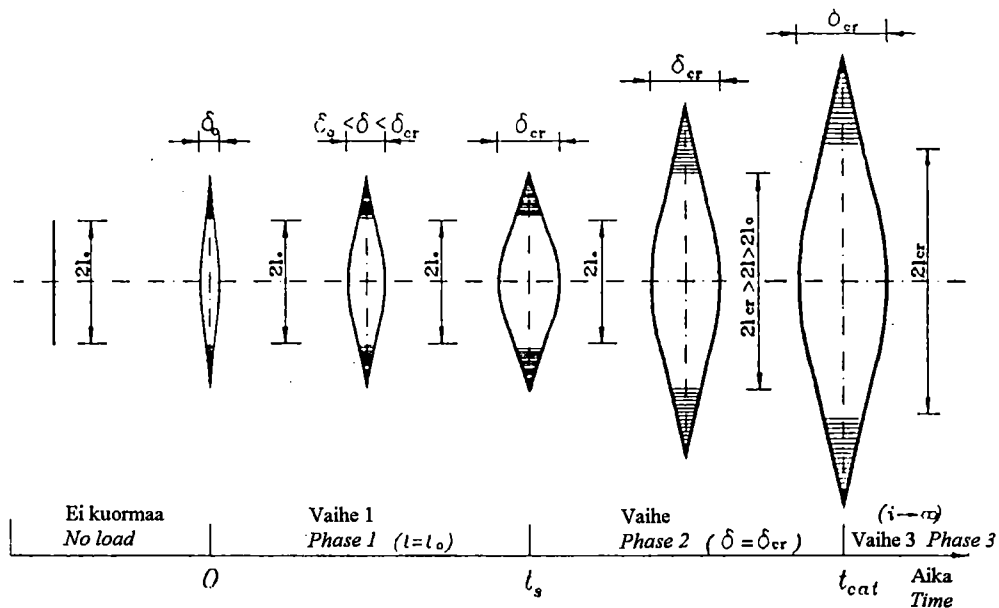
Kun leikkausjännitykset palkin päässä lasketaan siten, että vuosiluston pinta kuvataan kaltevilla tasolla ja tason leveytenä käytetään murtopinnan pituutta t , kuva 61, saadaan esim. palkin 16 murtotilassa leikkausjännitykseksi syyn suuntaan τ_1 1,2 MPa ja liukupinnan suuntaan τ_2 0,5 MPa. Tukireaktion F oletetaan jakaantuvan murtopinnalle 45° kulmassa pinnan pituudelle l_p .



Kuva 61. Kaltevan tason leikkausmurto.

Figure 61. Shear stresses in the slanting plane.

Ilmakuiva sahatavara sisältää aina kuivausjännityksen aiheuttamia halkeamia. Joutuessaan jännityksen alaisiksi ne saattavat aiheuttaa kappaleen murtumisen. Halkeaman kasvuvaiheet on esitetty kuvassa 62. Ensimmäisessä vaiheessa halkeama on kuormittamaton ja sen pituus on $2l_0$. Ajanhetkellä t_0 kuormitus lisätään ja halkeaman leveys σ_0 edustaa elastista muutosta. Tämä tapahtuu vaiheen I alussa. Kuormituksen jatkuessa halkeaman kärjessä tapahtuu plastista muodonmuutosta ja halkeaman leveys kasvaa. Ajanhetkellä t_s halkeama saavuttaa kriittisen leveyden σ_{CR} , jonka jälkeen halkeaman leveys ei enää voi kasvaa. Vaiheessa II halkeaman leveys on saavuttanut kriittisen arvonsa σ_{CR} , halkeaman kärki etenee ja halkeaman pituus kasvaa. Vaiheessa II halkeaman pituuden kasvu on hidasta, kunnes se saavuttaa kriittisen arvonsa $2l_{CR}$. Tämän jälkeen alkaa vaihe III, jossa halkeaman pituus kasvaa nopeasti ja rakenne murtuu. /32/



Kuva 62. Halkeaman kasvun kolme vaihetta. /32/
Figure 62. Expansion of the crack.

Wrightin /45/ tutkimusten mukaan männyn murtumissitkeys on suoraan verrannollinen tiheyteen, kun halkeama on säteen tai tangentin suuntainen. Verrannollisuuskertoimen suuruus riippuu vuosirenkaan ja halkeaman välisestä kulmasta, vuosirengasvälistä, kosteudesta ja koekappaleen koosta. Koon vaikutus on näistä heikoin. Wrightin tutkimuksessa kesäpuuprosentilla ei havaittu olevan vaikutusta murtumissitkeyteen.

Fonselius /46/ on pienillä kuusikoekappaleilla tehdyissä kokeissa todennut, että ilman suhteellisen kosteuden vaihtelu pienentää päätyhalkeilleen palkin pitkäaikaislujuutta merkittävästi. Koekappaleiden koko oli $20 \times 60 \times 600 \text{ mm}^3$ ja niiden päätyyn oli sahattu 1,5 mm leveä ja 150 mm pitkä halkeama. Kuusen elinikä laski 2,5 kuukaudesta 4 vuorokauteen kuormalla, jonka suuruus oli 75 % lyhytaikaisesta murtokuormasta.

7 PÄÄTELMÄT

7.1 Suunnitteluarvot

Materiaalin epähomogeenisuudesta johtuen puutavaran vetolujuus on pienempi kuin puristuslujuus. Taivutuksessa vetovyöhykkeessä sijaitsevilla heikoilla kohdilla, jotka edustavat vain pientä osaa, 5...10 %, koko palkin tilavuudesta, on suurin merkitys lujuuteen. Puun rungon tiheys kasvaa siirryttäessä ytimestä pintaan päin ja vuosilustojen paksuus pienenee. Yhdessä nämä tekijät vaikuttavat siihen, että esim. taivutuksessa eniten rasitetuilla alueilla eli palkin ylä- ja alapinnoissa on lujin puuaines. Järeän puun tyvässä puuaines on tiheintä ja oksat pienimpiä. Oksan koko ei myöskään kasva lineaarisesti puun pituuden tai paksuuden mukaan, vaan sillä on olemassa maksimiarvo. Puun ikääntyessä pitenee myös

puun rungon oksattoman vyöhykkeen absoluuttinen pituus. Järeässä sahatavarassa oksattoman osan koko pituus voidaan käyttää hyväksi. Kun järeää tukkia ei paloitella pieniin osiin, pienenee tukin sisäoksien merkitys. Järeässä lankussa sisällä olevien, kyljestyneiden oksien kohdalla palkin särmät jäävät ehjäksi. Taivutuksessa oksien vaikutus ei tällöin ulotu ylä- ja alapinnan eniten rasitetuille vyöhykkeille, joten sisäoksien vaikutus lujuuteen on merkityksetön.

Rakenteessa palkkiin kohdistuva kuormitus on usein suurimmillaan palkin jännevälän keskellä. Järeässä tukissa puun oksien koko ja määrä kasvaa tyvestä latvaan päin, joten heikkojen kohtien todennäköisyys on sitä pienempi mitä lähempänä tyveä ollaan. Sahatavarakappaleen koon kasvaessa ei oksien läpimitta kasva, sillä sekä kuusen että männyn suurimman oksan koko on lajille tyypillinen. Kärjistetysti voidaan verrata järeää sahatavaraa, normaalia esim. $50 \times 100 \text{ mm}^2$ soiroa ja $13 \times 42 \text{ mm}^2$ rimaa keskenään ja tutkia haluaisijaltaan 20 mm:n reiän vaikutusta kappaleiden lujuuteen. Mitä pienempi kappale, sitä suurempi on reiän vaikutus lujuuteen.

Kiilamaisen muodon vaikutus ja tyven hyvä lujuus olisi mahdollista käyttää hyväksi rakennejärjestelmissä, joissa sauvan toinen pää joutuu siirtämään suuria kuormia. Järeää puuta käytettäessä tämä kuitenkin edellyttää liitostekniikan kehittämistä.

Kokeiden ja kirjallisuuden perusteella 100 mm ja sitä leveämmät järeät lankut, joiden korkeus on yli 250 mm täyttävät lujuusluokan T30 vaatimukset. Kokeiden perusteella järeässä sahatavarassa ei tarvitse ottaa huomioon kokoon tai alle 6 m:n jännevälillä pituuteen liittyvää lujuuden redusointia. Järeän sahatavaran poikkileikkauksen optimointi yksinomaan korkeutta kasvattamalla ei kannata, sillä leveyden kasvaessa puulle tyypillisten vikojen, kuten oksien, merkitys pienenee ja lujuus kasvaa. Leveyden kasvaessa myös kappaleen tukialueella leimapaine pienenee. Vaihtelevissa kosteusolosuhteissa poikkileikkauksen koon kasvattaminen pienentää poikkileikkauksen keskimääräisen kosteuden vaihteluja, joten kosteusvaihtelujen vaikutus kappaleen lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiin pienenee.

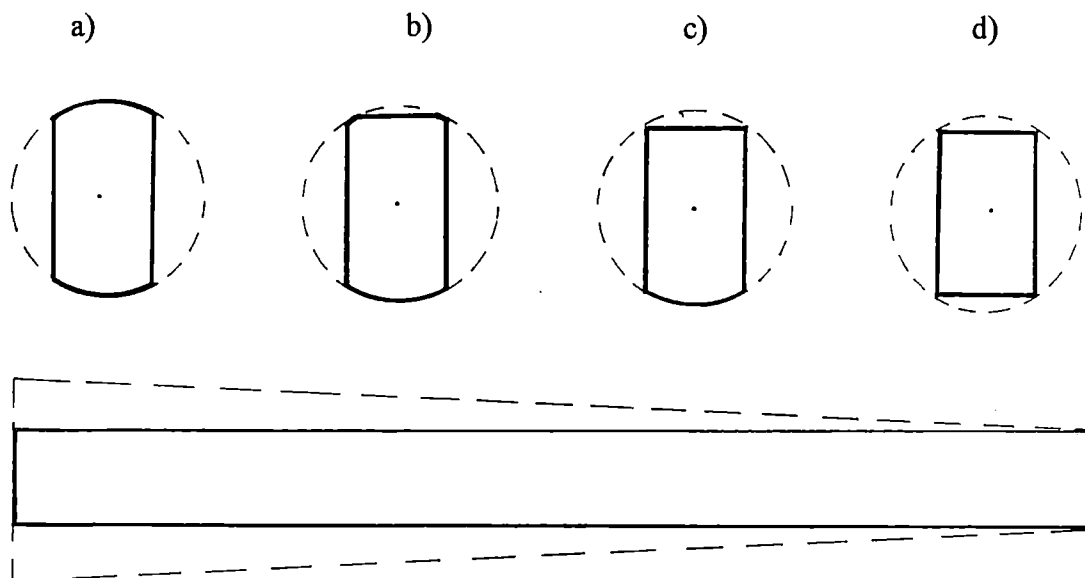
Päätyhalkeilun vaikutusta järeän sahatavaran leikkauslujuuteen ei kokeissa pystytty osoittamaan. Leikkaushalkeilu ei noudattanut kuivumishalkeilua. Se poikkesi lähellä puun pintaa kuivumishalkeamasta ja eteni vuosilustoa myöten, väistäen kappaleen sisään jäänyttä ydintä. Ytimen läheisyydessä ei kuitenkaan ole lujin kohta, sillä ytimen ympäristön tiheys oli koko poikkileikkauksen pienin. Sekä järeän sahatavaran leikkausmurtomekanismia että halkeilun vaikutusta järeän sahatavaran leikkauslujuuteen pitkäaikaiskuormituksen alaisena on tutkittava lisää.

7.2 Järeän sahatavaran sahaussuositus

Järeän sahatavaran raaka-aineena olevan tukin laatu arvioidaan ulkoisten ominaisuuksien perusteella. Laadukkainta puutavaraa saadaan riittävän tiheästä, hakkuin käsittelemättömästä metsästä /7/. Normaalialia sahatavaraa tehtäessä olisi kysymyksessä saannon optimointi, mutta järeän sahatavaran vaatiman suuremman työmäärän kompensoimiseksi on tukin

laadun oltava hyvä ja se on arvioitava yksilöllisesti. Ytimen läheisyydessä olevien vuosirenkaiden väli antaa viitteitä tyvitukin oksien koosta. Näkyvien oksien ja oksakyhmyjen perusteella tukki asetetaan sellaiseen asentoon, että sahatun aihion laatu on mahdollisimman hyvä. Tukki pyritään sahaamaan niin, että kappaleen syrjät jäävät mahdollisimman oksattomiksi ja kulmaoksia ei synny. Kappaleet nostetaan nostoliinon avulla, sillä kappaleiden omapaino on niin suuri, että nostokouran metallireunat painuvat syvälle kappaleen särmiin. Jos kuitenkin kappaletta joudutaan esim. nostokouran avulla siirtämään, on kouran ja puun väliin asetettava puiset suojapalat.

Järeässä sahatavarassa on mahdollista käyttää hyväksi puun luonnollisia ominaisuuksia. Järeään sahatavaraan käytetään puun tyviosaa, jossa puu on sekä tiheintä että pienioksisinta, jopa oksatonta. Lujuuden kannalta paras on kiilamainen, kahdelta sivultaan läpisahattu pelkka, kuva 63a. Tällöin puuaineen lujin osa jää eniten rasitetuille alueille. Käsittelemättömillä pinnoilla puun syiden rakennetta ei ole rikottu, joten oksien aiheuttama vinosyisyys ja sen vaikutus on pienimmillään. Liittyviä rakenteita varten voidaan pelkan yläpinta tasoittaa, kuva 63b. Tällöin kriittisin alue eli palkin alapinta jää ehjäksi ja sahauskeskeisen vaikutuksen on pieni. Sekä ylä- että alasärmä voidaan tasoittaa esim. levytystä varten, kuva 63c tai tukista voidaan sahata järeä täyssärmäinen sahatavarakappale, kuva 63d. Ydinkeskeisen sahatavaran käyttäytyminen taivutuksessa on poikkileikkauksen vaaka- ja pysty akselien suhteen symmetristä. Kieroutuminen kuivauksen aikana on ydinkeskeisellä sahatavaralla jopa kaksinkertainen verrattuna ytimen vierestä sahattuun /29/.

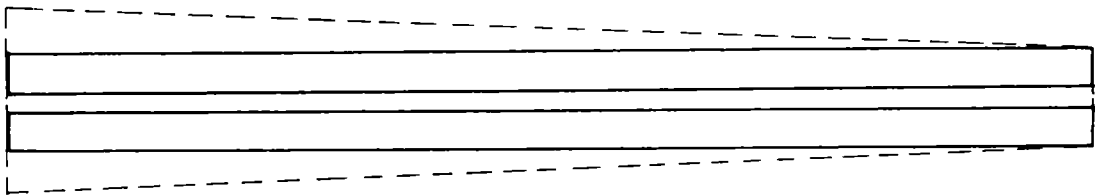
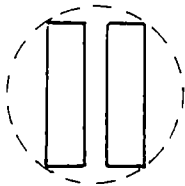


- a) Läpisahattu pelkka.
- b) Pelkan yläpinta tasoitettu, vajaasärmäinen
- c) Pelkan yläpinta täyssärmäinen
- d) Täyssärmäinen, järeä sahatavara

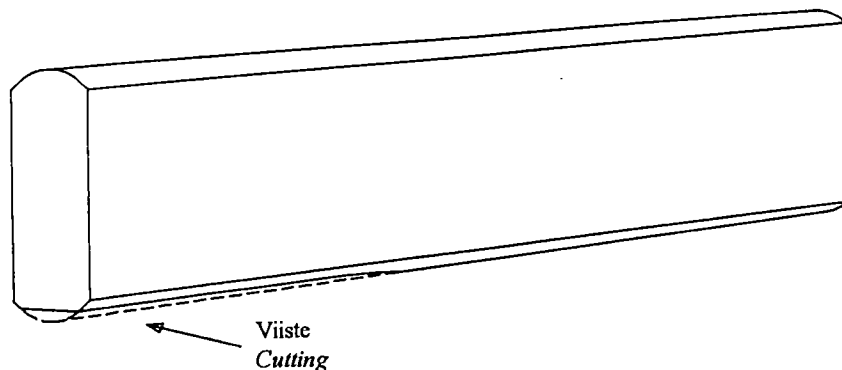
Kuva 63. Ydinkeskeisen, järeän sahatavaran eri poikkileikkausmallit.
Figure 63. Sawing types of central cross sections.

Tukki voidaan sahata myös niin, että ydin jää n. 4 cm paksun ydinlaudan keskelle ja aihiot sahataan jäljelle jääneestä osasta, kuva 64. Sahauksesta jäänyt ydinlauta voidaan käyttää esim. lattia- tai ulkoverhoukseen. Virpi /47/ on todennut normaalin sahatavaran kieroutumista tutkiessaan, että ydintä lähinnä oleva puuaines pitäisi poistaa kokonaan, sillä se on pääasiassa nuorpuuta, joka kutistuu epätavallisen paljon pituuden suuntaan. Sahaamalla järeät lankut tukin ytimen molemmilta puolilta saadaan sahatavaraa, jossa kuivauksen aiheuttamien halkeamien ja muodonmuutosten määrä pienenee verrattuna lankkuihin, joissa ydin on jäänyt sisään /21/. Jos esim. lattiakannattimille kieroutumisen ylärajaksi asetetaan 10 mm kappaleen pituudesta riippumatta, täyttää 5 m pitkistä ydinkeskeisistä kuusilankuista tämän vaatimuksen vain 20 %, kun ytimen vierestä sahatuista lankuista vaatimuksen täyttää 70 % /29/. Lujuus- ja kimmo-ominaisuudet paranevat sitä enemmän, mitä kauempaa ytimestä kappale sahatetaan /14/.

Palkin pää voidaan tasata liitospinnan saamiseksi, kuva 65. Tällöin on tasaisen pinnan jälkeen tehtävä riittävän loiva viiste, ettei lovivaikutus heikennä lujuutta.



Kuva 64. Ytimen vierestä sahatut aihiot. /21/
Figure 64. Planks that are sawn outside the heart of the wood.



Kuva 65. Palkin pään tasaus ja viiste liitospintoja varten.
Figure 65. Cutting and trimming the beam end for jointing.

7.3 Järeän sahatavaran kuivaus

Järeää sahatavaraa varten tukit kaadetaan talvella. Talvella pitkän tukin kuljetus on helpompaa. Maapohja kantaa, kasvillisuus vaurioituu vähemmän ja sienten leviämismahdollisuudet ovat pienimmillään /21/. Talvikaatoisessa puutavarassa voidaan käyttää hyväksi kevään kuivien päivien koko kuivausteho. Kuivuminen alkaa jo huhti-toukokuun vaihteessa. Kun käytetään hyväksi koko kuivumisaika, niin 100 mm paksu lankku on ilma kuivaa seuraavan vuoden kesällä. Järeän sahatavaran kuivaus on tehtävä hitaasti, ettei kappaleen pinnan ja sisäosien välille synny liian suurta kosteuseroa. Liian kuiva pinta kutistuessaan halkeaa helposti. Hitaassa kuivauksessa pinnan solut viruvat, eivätkä halkeamat synny niin helposti.

Lankut tapuloidaan ilmastavasti ja suojataan sekä suoralta auringonpaisteelta että kosteudelta. Kosteuden siirtyminen lattiasta päin on myös estettävä. Suojaksi riittää katto ja seinät, esim. kevytrakenteinen vaja tai suojapeite ja telineet. Tärkeintä on, että kuivattavan puutavaran ympärille jää riittävästi tyhjää ilmatilaa, ilma pääsee liikkumaan eikä vesi pääse suoraan kosketukseen sahatavaran kanssa /21/.

Leikkauskestävyyteen haitallisesti vaikuttavaa päätyhalkeilua voidaan vähentää suojaamalla lankun päät tiiviillä, vesihöyryn poistumista hidastavalla pinnoitteella. Päätyhalkeilu saattaa aiheuttaa lankun molempiin päihin yli puoli metriä pitkän alueen, jossa halkeama ulottuu kappaleen läpi. /21/

Ydinkeskeisen sahatavaran ominaisuudet eivät kuitenkaan ole kuivauksen kannalta parhaat mahdolliset, sillä se halkeaa. Lankuissa, jossa ydintä ei ole, halkeamia on vähemmän ja ne ovat pienempiä.

7.4 Järeän sahatavaran käyttömahdollisuudet ja kilpailukyky

Järeää sahatavaraa voidaan käyttää maatalouden varasto- ja tuotantorakennuksissa, asuinrakennuksissa, katoksissa, silloissa sekä yhdyskuntarakentamisessa, kuten meluaidoissa tai maanpaineseinissä. Se soveltuu myös liikennemerkki- ja johtokannatteisiin, telineisiin, valaisinpylväisiin sekä erikoisrakenteisiin, kuten torneihin tai hyppyrimäkiin. Palkki-pilarijärjestelmän jännemitta on enintään 6 m ja se sopii halleihin, varastoihin, maatalouden ja teollisuuden tuotantotiloihin sekä asuinrakennuksiin. Kehärakenteita käyttämällä päästään enintään 12 m:n jännemittaan. Kehä voidaan tehdä joko kytkettynä tai nivelellisenä. Käyttämällä kiilamaista puutavaraa, voidaan puunenekki optimoida. Kehät soveltuvat avonaista tilaa edellyttävien halli- ja varastotilojen sekä maatalouden tai teollisuuden tuotantotilojen rakenteisiin. Kantavat seinät -järjestelmässä järeää sahatavaraa käytetään lähinnä kantaviin vaakarakenteisiin. Jos katon kolmioristikko tehdään järeästä sahatavaraa, saadaan täysin vapaa ullakkotila. Kontaktiitoksilla järeää puuta voidaan liittää edullisesti verrattuna metallisilla liittimillä tehtyihin. /48/

Normaalin sahatavaran kapasiteetti loppuu jo noin 4 m:n jänneväliä ja jo 4...6 m:n jänneväleillä on turvauduttu liimapuun käyttöön. Puun sahaaminen pieneksi ja liimaaminen suuremmaksi kappaleeksi kuluttaa energiaa puun kuljetuksessa, työstössä, kuivauksessa ja liimauksessa. Energiankäytön aiheuttamat lisäkustannukset siirtyvät tuotteen hintaan.

Järeän sahatavaran valmistusenergia on pieni. Suurten mittojen vuoksi laadullisesti parasta sahatavaraa saadaan hitaalla ilmakeivauksella. Puun kuivaamiseen ei ole syytä käyttää lämmitystä, joten energiaa ei käytetä veden höyrystämiseen. Ilmakeivaksi 100 mm paksu lankku saadaan vuodessa.

Raaka-aineen tuottajalle olisi edullisinta puun omakäyttö mahdollisimman raaka-ainemuodossa ja vienti mahdollisimman jalostettuna. Tällöin hyödynnetään parhaiten omia raaka-ainevaroja. Kun sahatavara-aihion sahaus ja kuivaus tapahtuu lähellä raaka-ainelähdettä, vähenee veden kuljetus paikasta toiseen ja samalla puun jalostusarvo säilyy paikkakunnalla. Kuljetuskustannusten osuus puun koko arvo-osuudesta pienenee, kun sen jalostusarvoa nostetaan.

Kilpailuetuna voidaan pitää myös psykologisia ja esteettisiä tekijöitä. Poikkileikkauksen suuri koko on ulkonäöllisesti edullinen ja massiivinen palkki mielletään lujaksi. Ääni- ja paloteknisesti puupoikkileikkauksen massan ja jäykkyyden kasvattaminen on edullista. Liitokset ovat yksinkertaisia tehdä puuntyöstöön tarkoitetuilla koneilla ja järeässä poikkileikkauksessa on varaa tehdä loveuksia. Metalliset liitoselimet on mahdollista upottaa puun sisään, joten liitosten ulkonäkö ja palonkestävyys paranee.

Järeä sahatavara on kilpailukykyinen liimapuu- ja ristikkorakenteiden kanssa jännevälissä, joihin nykyisen sahatavaran mitat eivät riitä. Kehärakenteissa järeällä sahatavaralla päästään jopa 12 m:n ja yksiaukkoisena palkkina 6 m:n jänneväleihin. Jännevälän kasvattaminen riittää normaaleihin maatalouden tuotantorakennuksiin. Pien- ja kerrostaloihin järeä puu tuo lisävaihtoehtoja suurien ja avoimien tilojen rakentamiseen. Erityisesti ääneneristys- ja palonkestovaatimusten täyttäminen helpottuu, kun rakenteen massaa kasvatetaan. Korjausrakentamisessa järeä sahatavara antaa mahdollisuuden alkuperäisiä rakenteita kunnioittavien ratkaisujen käyttöön. Poikkileikkausta kasvattamalla rakenteet voidaan mitoittaa kestävämmän vaadittu palonkesto aika. Massiivipuusta syttyy hitaasti ja pintakerroksessa palon leviämistä voidaan estää tai hidastaa palosuojaamalla.

7.5 Jatkotutkimusehdotukset

Järeässä tukissa on oksien kyljestyminen yleensä kehittynyt pitkälle. Onko kaikki järeästä tukista ohjeiden mukaan sahattu täyskanttinen sahatavara luokkaan T30 kuuluvaa? Näyttäisi siltä, että erityisesti mäntytukista sahattu järeä sahatavarakappale täyttää helposti luokan T40 vaatimukset.

Järeän sahatavaran kuivumis-, halkeilu- ja muodonmuutosominaisuudet olisi selvitettävä pitkäaikaiskokeiden avulla. Erityisesti järeän lankun kiertyminen kuivumisen aikana edellyttää lisätutkimuksia. Lankun asentaminen rakenteeseen tuoreena ja kuivattaminen paikalleen asennettuna saattaa pitkän kuivumisajan vuoksi tulla kysymykseen, joten kuivumisen aiheuttamat lisärasitukset liitoksille ja liittyville rakenteille saattavat olla merkittäviä.

Puun virumisominaisuudet tangentin suunnassa sekä vaihtelevan kosteuden vaikutuksen avulla viruman lisääminen ja pinnan halkeilun vähentäminen olisi tutkittava. Voidaanko vaihtelevan kosteuden avulla pienentää esim. kappaleen kiertymistä?

Kosteus- ja aikavaikutus on määritetty pienistä koekappaleista, mutta järeässä poikkileikkauksessa ilmiöt tapahtuvat puun pintaosissa. Miten suuri merkitys vaihtelevalla kosteudella todellisuudessa on järeän palkin lujuus- ja virumaominaisuuksiin?

Lujuuskokeet olisi tehtävä riittävän suuresta koekappalemäärästä, jolloin hajonnan merkitys jäisi mahdollisimman pieneksi.

Pitkäaikaislujuuden tutkiminen ja erityisesti halkeamien vaikutus järeän puun leikkauslujuuteen.

Sekä syyn että tangentin suuntaisen pitkäaikaisen leikkauslujuuden määrittäminen pienistä koekappaleista.

Erikoiskohtien, kuten tuki- ja liitosalueen lujuuden tutkiminen:

- Poikkileikkauksen epätasaisen kosteusjakauman aiheuttamat lisäjännitykset ja niiden merkitys halkeaman avautumiseen ja sen etenemiseen.
- Kuivumisen seurauksena poikkileikkaus ei enää ole suorakaiteen muotoinen. Kuinka suuri merkitys on epäkeskisyyden aiheuttamalla lisäkuormituksella leikkaushalkeaman alkuvaiheessa sen etenemiseen?
- Kuivumismuodonmuutosten estämisestä johtuvat vääntörasitukset ja niiden aiheuttamat jännitykset ja halkeilu.
- Pinta- ja sydänpuurajan merkitys sahatavaran pinnan halkeilulle ja leikkausmurron kehittymiselle.

8 YHTEENVETO

Puun ominaisuuksien vaihtelu perintö-, kasvupaikka- ja ympäristökijöistä johtuen antaa mahdollisuuden entistä tehokkaampaan ja optimaalisempaan metsien ja puuraaka-aineen hyväksikäyttöön. Laadukkain raaka-aine saadaan riittävän tiheästä, hakkuin käsittelemättömästä metsästä /7/.

Puun rungon tiheys kasvaa siirryttäessä ytimeä pintaan päin ja vuosilustojen paksuus pienenee. Yhdessä nämä tekijät vaikuttavat siihen, että esim. taivutuksessa eniten rasitetuilla vyöhykkeillä on lujin puuaines. Järeään sahatavaraan käytetään puun tyviosaa, jossa puuaines on tiheintä ja oksat pienimpiä. Oksan koko ei kasva lineaarisesti puun pituuden tai paksuuden mukaan, vaan sillä on olemassa maksimiarvo. Puun ikääntyessä pitenee puun rungon oksattoman vyöhykkeen absoluuttinen pituus. Järeässä sahatavarassa pintapuun oksattoman osan koko pituus voidaan käyttää hyväksi. Tukin sisäoksien merkitys pienenee, kun järeää tukkia ei paloitella pieniin osiin. Järeässä lankussa sisällä olevien, kyljestyneiden oksien kohdalla palkin särmät jäävät ehjäksi. Taivutuksessa oksien vaikutus ei tällöin ulotu poikkileikkauksen ylä- ja alapinnan eniten rasitetuille vyöhykkeille, joten sisäoksien vaikutus lujuuteen on merkityksetön. Lujuuden kannalta paras on kiilamainen, kahdelta sivuiltaan läpisahattu pelkka. Käsittelemättömillä pinnoilla puun syiden rakennetta ei ole rikottu, joten oksien aiheuttama vinosyisyys ja sen vaikutus on pienimmillään. Kiilamaisen

muodon vaikutus ja tyven hyvä lujuus olisi mahdollista käyttää hyväksi rakennejärjestelmässä, joissa sauvan toinen pää joutuu siirtämään suuria kuormia. Järeän puun osalta tämä kuitenkin edellyttää liitostekniikan kehittämistä.

Ydinkeskeisen sahatavaran kieroutuminen kuivauksen aikana on jopa kaksinkertainen verrattuna ytimen vierestä sahattuun. Sahaamalla järeät lankut tukin ytimen molemmilta puolilta saadaan sahatavaraa, jossa kuivauksen aiheuttamien halkeamien ja muodonmuutosten määrä pienenee verrattuna lankkuihin, joissa ydin on jäänyt sisään. Lujuus- ja kimmo-ominaisuudet paranevat, kun siirrytään ytimestä pintaan päin /14/.

Kokeellisessa osassa järeiden lankkujen oksamittaustuloksien perusteella määritettiin Utusen fortran-ohjelman /7/ avulla lankkujen lujuusvyöhykkeet. Kuusilankuissa lujuusluokan T40 pituus oli keskimäärin 259 cm ja lujuusluokan T30 pituus 410 cm. Mäntylankuista saatiin kaikista vähintään 5 metriä luokkaan T40 luokiteltua sahatavaraa.

Koetulosten perusteella järeiden lankkujen taivutuslujuuden ominaisarvoksi f_{bk} kosteusluokassa 3 ja aikaluokassa C saatiin 26,9 MPa. Tiheys- ja kosteuskorjatuksi taivutuslujuuden ominaisarvoksi saatiin 34,3 MPa. Pääasiassa ero syntyy koetulosten hajonnan pieneneemisestä. Suorakaidepalkkien kimmomodulin E_f ominaisarvoksi saatiin 7200 MPa. Jos kimmomoduli E_f lasketaan kaikkien kuormitettujen palkkien perusteella, saadaan ominaisarvoksi 9000 MPa. Koetulosten perusteella 100 mm ja sitä leveämmät järeät lankut, joiden korkeus on yli 250 mm, täyttävät lujuusluokan T30 vaatimukset.

Koetulokset ja kirjallisuudessa esiintyvät tiedot viittaavat siihen, että puupoikkileikkauksen taivutuskestävyyden optimointi yksinomaan korkeutta kasvattamalla ei johda parhaaseen lopputulokseen. Leveyden kasvaessa puulle tyypillisten vikojen, kuten oksien, merkitys pienenee ja lujuus kasvaa /32/. Poikkileikkauksen koon kasvattaminen pienentää poikkileikkauksen keskimääräisen kosteuden vaihtelua, joten niiden vaikutus kappaleen lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiin pienenee.

Päätyhalkeilun vaikutusta järeän sahatavaran leikkauslujuuteen ei kokeissa pystytty osoittamaan. Brutto-poikkileikkauksen perusteella määritetyn leikkauslujuuden ominaislujuudeksi f_{vk} saatiin 2,8 MPa. Jos leikkauslujuusarvot määritetään ehjälle poikkileikkaukselle, lujuuden keskiarvo kasvaa, mutta myös hajonta kasvaa niin, että pienellä otoskoolla leikkauslujuuden ominaisarvoksi saadaan 1,9 MPa. Leikkaushalkeilu ei noudattanut kuivumishalkeilua, vaan se poikkesi lähellä puun pintaa kuivumishalkeamasta ja eteni vuosilustoa myöten, väistäen kappaleen sisään jäänyttä ydintä. Ytimen läheisyydessä ei kuitenkaan ole lujin kohta, sillä ytimen ympäristön tiheys oli koko poikkileikkauksen pienin. Sekä järeän sahatavaran leikkausmurtomekanismi että halkeilun vaikutus järeän sahatavaran leikkauslujuuteen pitkäaikaiskuormituksen alaisena tarvitsee lisätutkimusta.

KIRJALLISUUSLUETTELO

- /1/ TOMPPO. Paperi ja puu, vol 76, nro 1-2 1994, s. 10-14.
- /2/ PENNANEN, O. & YLI-HUKKALA, T. Järeän kuusen käyttö. Paperi ja puu, vol 76, nro 4, 1994.
- /3/ HEISKANEN, V. Puiden paksuuden ja nuoruuden kehityksen sekä oksaisuuden ja sahapuulaadun välisistä suhteista männikössä. Acta Forestalia Fennica 80:2, Helsinki 1966.
- /4/ JALAVA, M. Puun rakenne ja ominaisuudet. WSOY, Porvoo - Helsinki 1952.
- /5/ VIITANIEMI, P. Puun kierteisyys ja sen mittaaminen. VTT Tutkimuksia 522, Espoo 1988.
- /6/ JALAVA, M. Suomalaisen männyn, kuusen, koivun ja haavan lujuusominaisuuksista. Helsinki 1945.
- /7/ UTUNEN, M. Saatavissa oleva järeä puutavara ja tukkien virhetarkastelu. Erikoisharjoitustyö. Helsingin Yliopisto, Metsävarojen käytön laitos. 1993, julkaisematon.
- /8/ HAKKILA, P., LAASASENAHO, J. & OITTINEN, K. Korjuuteknisiä oksatietoja. Folia Forestalia 147, Helsinki 1972.
- /9/ KÄRKKÄINEN, M. Puutiede. Karisto 1985.
- /10/ KÄRKKÄINEN, M. Havutukkien painomittauksen edellytyksiä puutieteelliseltä kannalta. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 89:1, 1976.
- /11/ HAKKILA, P. Mänty-, kuusi- ja koivurunkojen puuaineen tiheys ja kuivapainotaulukot. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 96:3, 1979.
- /12/ HAKKILA, P. & UUSIVAARA, O. Viljelykuusikoitten puuaineen tiheydestä. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 66:6, 1968.
- /13/ KÄRKKÄINEN, M. & DUMELL, O. Kuusipuun taiputuslujuuden riippuvuus tiheydestä ja vuosiluston leveydestä Etelä- ja Pohjois-Suomessa. Silva Fennica vol 17, 1983, nro 2, s. 125 - 135.
- /14/ KLINGER, R., PERSTORPER, M. & JOHANSSON, G. Influence of spatial position on the bending stiffness and strength of norway spruce timber. IUFRO/s5.02, Sydney, Australia, July 5-7, 1994.
- /15/ KÄRKKÄINEN, M. Malli männyn, kuusen ja koivun puuaineen oksaisuudesta. Silva Fennica 1986, vol 20 nro 2, s. 107 - 116.

- /16/ KÄRKKÄINEN, M. Havaintoja kuusen oksaisuudesta. *Silva Fennica* vol 6, 1972, nro 2, s. 90 - 115.
- /17/ PIETILÄ, J. Factors affecting the healing-over of pruned Scots pine knots. *Silva Fennica* 1989, vol 23 no 2, s. 125 - 158.
- /18/ SIIKANEN, U. Puurakennusten suunnittelu. RKOY, Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä 1990.
- /19/ ISOMÄKI, O. Puutavaran kuivaus ja puutavarakuivaamot. Luoteis-Uusimaan kirjapaino, Vihti 1962.
- /20/ ABSETZ, I. Sydänpuu-pintapuun rajapinnan tasapainokosteus puun syiden kyllästymispisteen yläpuolella. TKK/TRT Julkaisu nro 22.
- /21/ PIHLAJAMAA, T. Järeän puutavaran hidas kuivaus. Erikoistyö. TKK Talonrakennustekniikka. 1995, julkaisematon.
- /22/ SIIMES, F.E. Puun rakenne ja yleiset ominaisuudet. Kirjapaino Polytypos, Turku 1954.
- /23/ JALAVA, M. Puun kosteuspitoisuuden, koon ja muodon muutoksista. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 18:2, 1933, 71 s.
- /24/ KÄRKKÄINEN, M. & RAIVONEN, M. Reaktiopuun mekaaninen lujuus. *Silva Fennica* vol. 11, 1977, nro 2, s. 87 - 96.
- /25/ SAARELAINEN, U. Puurakenteet I, Puu materiaalina. Rakentajain kustannus OY, Helsinki 1981.
- /26/ NOKELAINEN, T., TORATTI, T. & KANERVA, P. Oksien ja vinosyisyyden vaikutus sahatavaran lujuusominaisuuksiin. TKK Talonrakennustekniikan laboratorio, Julkaisu 9, Espoo 1989.
- /27/ RIL 162-1 Puurakenteet 1. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki 1987.
- /28/ SKAAR, C. Wood-Water Relations. 1988.
- /29/ JOHANSSON, G., KLINGER, I. & PERSTOPER, M. Large-size spruce timber - Structural properties and grading methods. Pacific Timber Engineering Conference. July 11 - July 15 1994. Gold Coast.
- /30/ VIITANIEMI, P. Kuusen kieroutuminen. VTT Tutkimuksia 562, Espoo 1988.
- /31/ RANTA-MAUNUS, A. Puun ominaisuudet puurakenteiden rakenteellisen suunnittelun kannalta. RIL K161-1993, osa 2, s. 5 - 18, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki 1993.

- /32/ MADSEN, B. Structural behaviour of timber. Timber Engineering Ltd, Vancouver 1992.
- /33/ TORATTI, T. Creep of Timber Beams in a Variable Environment. Väitöskirja 1992, TKK.
- /34/ Timber Design & Construction Sourcebook (Holzbau Atlas).
- /35/ MÄKIPURO, R. Puupylväiden lujuuslaskentaohje. Lahontorjuntayhdistys r.y., 1981.
- /36/ Puurakennustaito. Suomen Kirja Oy, Tilgmannin kirjapaino 1946.
- /37/ Puunsuojaus. Lahontorjuntayhdistys ry. Hanko 1988.
- /38/ KALLIO, T. Esimerkki kuusikon lahovikaisuuden Etelä-Suomessa aiheuttamasta taloudellisesta menetyksestä. Silva Fennica vol. 6, 1972, nro 2, s. 166 - 124.
- /39/ KORTESMAA, M. Eurocode 5 ja puurakentamisen normit. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry. RIL K161-1993, osa 3, s. 13 - 48, Helsinki 1993.
- /40/ Suomen rakentamismääräyskokoelma B10, Puurakenteet. Sisäasiainministeriö, Helsinki 1983.
- /41/ EHONIEMI, K. & LINDBERG, R. Hirsirakenteiden kestävyys. TTKK, Rakennustekniikan osasto, Talonrakennustekniikka. Raportti 37, Tampere 1989.
- /42/ NAKAI, T., NAGAO, H. & TANAKA, T. Comparison of Full-Size Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) Structural Performance in bending of Round Timber, Two Surfaces Sawn Timber and Square Sawn Timber. CIB W18A, Sydney, July, 1994.
- /43/ LIPITSÄINEN, R. Sahatavaran lujuuslajitteluopas. 2.painos, 1993.
- /44/ RIL-120, Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry, Helsinki 1986.
- /45/ WRIGHT, K. Männyn ja kuusen murtumissitkeyden määrittäminen CT-koekappaleilla. VTT Tutkimuksia 387, Espoo 1986.
- /46/ FONSELIUS, M. Long-term experiments with end-cracked wooden beams. Wood Science and Technology, 27:137-150, 1993.
- /47/ VIRPIÖ, S. Sahatavaran kieroutumisen analysointi elementtimenetelmällä. VTT Tutkimuksia 594, Espoo 1989.
- /48/ VUORINEN, T. Järeän sahatavaran käyttö rakennuksissa, rakennejärjestelmät ja liitokset. TKK Talonrakennustekniikka. Diplomityö 1994.
- /49/ ASTM D 198, Standard Methods of Static Tests of Timbers in Structural sizes. American

NÄYTE			MITAT					YDIN				VUOSIRENGASVÄLI				HALK. SYVYYS		VAJAASÄRMÄ		HUO
KPL no:	TUKKI no:	PUU-LAJI	tyvi t [mm]	tyvi h [mm]	latva t [mm]	latva h [mm]	pituus [m]	tyvi x [mm]	tyvi y [mm]	latva x [mm]	latva y [mm]	tyvi [mm]	latva [mm]	tyvi max.	latva max.	tyvi [mm]	latva [mm]	syväveä [mm]	lapeveä [mm]	
1	10	K	101	298	102	296	10.48	122	39	87	50	2.9	2.9	4.0	6.0	15	46	1/1		
2	1	M	96 99	300 303	- 96	300 300	10.54	132	55	-	-	1.9	-	4.0	2.5	läpi	0	61/100	39/298	
3	1	M	91 101	304 302	101 101	295 296	10.54	104	-	155	21	2.0	1.7	3.0	3.0	läpi	läpi	29/105	19/305	
4	8	K	69 64	368 365	68 65	265 263	10.48	192	-	134	0	3.1	3.7	5.0	6.0	30	läpi	1/1	16/349	
5	8	K	72 72	376 370	73 76	268 268	10.48	183	7	134	0	3.4	3.8	5.5	6.0	läpi	45	1/1	X/341	
7	11	K	94 87	345 343	95 91	238 231	10.46	149	14	129	33	2.6	2.7	5.5	6.0	läpi	0	42/99	34/264	
8	11	K	72 75	347 350	74 75	250 249	10.48	172	-	111	-	2.7	2.6	7.0	4.0	32	0	24/77 46/77	22/254 31/258	A B
9	18	K	104 102	300 298	100 100	300 296	7.64	165	-	156	0	6.0	3.8	10.0	5.0	läpi	50	11/104 33/104	7/299 25/299	C
10	12	K	100 98	241 242	101 100	234 231	7.57	72	51	102	43	1.9	1.9	5.0	5.0	29	44	20/102 27/97	12/235 10/242 14/100	D E
11	18	K	97 100	302 300	99 97	298 298	7.64	132	10	142	0	3.9	3.7	9.0	5.0	läpi	22	13/100 17/86	10/298 11/301	
12	16	K	144 148	281 277	- -	- -	7.57	125	68	-	-	3.1	3.8	8.0	7.5	60	58	1/1 27/147 35/147	57/280 31/280	F
13	14	K	138 147	304 304	152 riistimitta	300	7.59	167	34	148	93	3.5	2.9	6.0	5.0	27	läpi	40/140 57/152 35/152	14/308 10/307 28/302 27/300	
14	25	K	95 -	254 256	100 99	251 253	7.57	94	42	117	67	2.6	2.9	5.0	5.5	läpi	33	8/102 16/100 28/100 5/255 41/100 13/252	3/253 5/255 11/252	G
15	15.	K	96 101	340 340	101 98	251 250	7.58	170	0	114	-	2.6	3.0	6.0	6.0		23			
16	15	K	102 101	344 342	98 103	241 240	7.56	161	1	177	0	2.9	2.8	9.0	6.5	0	läpi	84/103 39/108	46/311	
17	4	M	79 75	256 253	74 75	251 249	7.56	118	15	125	-	1.4	1.5	5.0	3.5	läpi	läpi	23/78 16/75	12/252	
18	7	K	74 74	253 254	74 74	250 249	7.57	121	20	127	13	2.2	2.6	5.0	5.5	0	18	40/78 46/78	17/251	
19	4	M	78 82	255 254	74 75	252 251	7.57	135	-	127	0	1.4	1.4	3.0	5.0	läpi	läpi	41/86	25/252	
20	2	M	73 74	251 251	73 74	252 252	7.57	98	7	113	33	2.1	1.7	4.0	4.0	20	42			
21	2	M	76 74	250 251	75 75	248 249	7.57	104	-	113	-	2.5	1.4	4.0	3.0	0	0	26/73 28/76	20/250 20/250	
22	2	M	74 72	250 246	75 72	250 249	7.57	155	-	135	-	2.2	1.5	3.0	2.0	0	0	24/75 16/74	24/251 13/245	
23	7	M	124 126	250 250	127 125	253 250	7.57	104	67	99	53	1.4	1.4	3.5	1.5	läpi	läpi	1/1 24/250 9/253		H I I
24	13	K	123 115	370 370	124 126	300 298	7.55	168	0	154	50	2.5	2.7	8.0	3.5	-	läpi	17/124 1/1		J
25	5	M	123 126	278 281	124 125	278 -	7.58	152	55	145	15	1.4	1.4	5.0	4.0	89	läpi	94/125 43/278 28/127		
26	3	M	100 96	368 364	100 100	272 272	7.58	95	12	123	-	2.2	1.6	5.5	5.0	32	0			
27	3	M	102 100	361 358	102 100	272 268	7.57	267	-	165	2	2.2	1.6	6.0	5.5	56	0	48/104 19/101	23/341 34/312	

PUULAJI

K = kuusi
M = mänty

POIKKILEIKKAUKSEN MITAT ON MITATTU JOKAISelta SÄRMÄLTÄ.
ENSIMMÄISELLÄ RIVILLÄ ON KOORDINAATIAXSELIN MITAT, MUUT MITAT ON ILMOITETTU NÄISTÄ LÄHTIEN

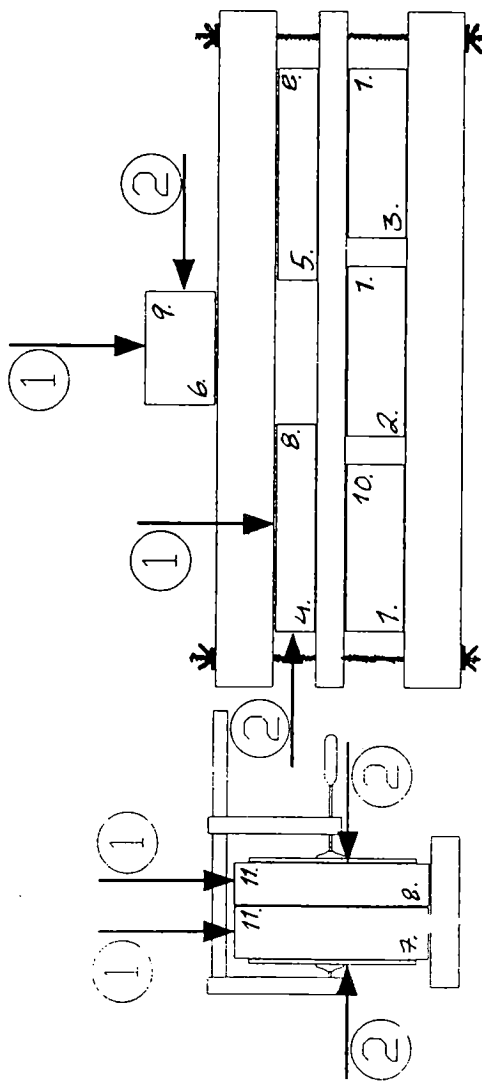
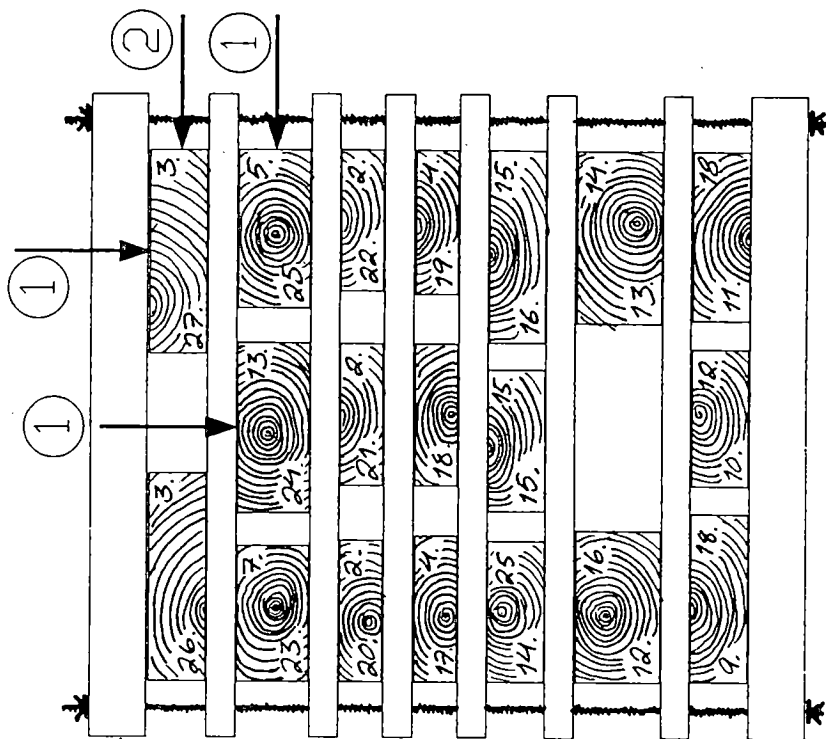
VAJAASÄRMÄ ON ILMOITETTU VAJAAN OSAN SUHTEENA KOKO SIVUN LEVEYTEEN.
MERKINTÄ 1/1 TARKOITTAÄ ETTÄ SIVU ON TÄYSVAJAA.

MUOTOVIKOJA EI MITATTU TASAISEN ALUSTAN PUUTTEEN VUOKSI

HUOMAUTUKSET:

A = 9.82 m
B = 7.66 m
C = 6.26 m
D = 6.19 m
E = 6.87 m
F = täysveä 6.84 m:stä lähtien
G = veä 6.14 m lähtien
H = täysveä 7.3 m lähtien
I = 7.28 m
J = 9.30 m
(mitat etäisyytenä tyvestä)

SAHATTUJEN KOEKAPPALEIDEN TAPULOINTI SEKÄ
KAPPALEIDEN KIINNITYS RUUVIPURISTIMELLA



tukkinumero

koeappaleen numero

KOEKAPPALE		PAINO		KOST.	MITTAUS												TIHEYS uf = 26										
TUKKI no:	TUNNUS	märkä 15.11.93 g	kuiva 30.11.93 g		%	märkänä						kuivana						tuore kg/m3	kuiva kg/m3	kuiva kg/m3	15% kg/m3	15% kg/m3					
						a mm	b mm	c mm	a mm	b mm	c mm	a mm	b mm	c mm													
11	MURTO	343,640	282,18	21,8																							
	T4	42,726	35,371	20,8	50,57	50,51	50,69	50,85	37,41	37,30	48,01	47,93	50,57	50,54	36,42	36,24	448	403		433							
	T3	40,094	33,074	21,2	50,45		50,60		37,19		47,84		50,51		36,06		423	380		409							
	T2	39,624	32,642	21,4	50,42	50,35	50,52	50,44	37,28	37,29	47,87	47,64	50,43	50,34	36,37	36,31	420	376		404							
	T1	35,697	29,427	21,3	50,27		50,38		37,30		47,40		50,25		36,24		382	336		361							
	TA	30,692	25,348	21,1	50,30	50,25	50,20	50,16	37,30	37,41	47,89	47,71	50,09	50,07	36,41	36,38	386	340		366							
	TB	33,360	27,617	20,8	50,02		50,20		37,11		48,13		50,05		36,02		413	372		400							
	TC	32,732	27,209	20,3	50,08	50,24	50,26	50,23	31,41	31,53	48,36	48,39	50,13	50,12	30,88	30,70	404	363		390							
	TD	36,567	30,639	19,3	50,40		50,20		31,64		48,42		50,11		30,54		448	409	373	441	401						
	L4	43,949	36,552	20,2	50,51	50,48	50,61	50,60	32,04	31,98	47,72	47,86	50,50	50,50	31,22	31,10	474	431		464							
	L3	40,992	33,873	21,0	50,45		50,58		31,87		47,59		50,49		30,97		443	401		432							
	L2	37,518	30,944	21,2	50,46	50,46	50,44	50,42	31,85	31,85	47,93	47,85	50,35	50,34	31,17	31,14	404	364		391							
	L1	37,794	31,174	21,2	50,44		50,40		31,84		47,77		50,33		31,10		411	369		397							
	LA	34,065	28,097	21,2	50,23	50,18	50,20	50,14	36,58	36,59	48,26	48,22	50,08	50,04	34,77	35,00	426	379		408							
	LB	34,482	28,496	21,0	50,12		50,08		36,59		48,17		49,99		35,22		431	388		417							
	LC	38,371	31,812	21,0	50,29	50,22	50,32	50,21	31,70	31,70	48,77	48,60	50,17	50,08	30,13	30,45	471	430		462							
	LD	38,444	32,039	20,6	50,15		50,09		31,70		48,43		49,99		30,76		474	432	399	465	429						
				20,9	50,37	50,31	50,42	50,30	31,49	31,63	47,89	47,80	50,36	50,23	30,31	30,63	428	386	386	415	415						
				20,9	50,25		50,18		31,77		47,70		50,09		30,95		428	386	386	415	415						
				20,9	50,44	50,37	50,57	50,47	32,19	32,03	47,82	47,54	50,48	50,41	30,96	30,88	428	386	386	415	415						
				20,9	50,29		50,36		31,87		47,46		50,33		30,80		428	386	386	415	415						
				20,9	50,47	50,40	50,50	50,59	31,81	31,79	47,73	47,56	50,60	50,52	30,85	30,88	428	386	386	415	415						
				20,9	50,32		50,67		31,76		47,38		50,44		30,86		428	386	386	415	415						
				20,9							549,53					532,76	428	386	386	415	415						

KOEKAPPALE		PAINO		KOST.	MITTAUS												TIHEY uf = 26									
TUKKI no:	TUNNUS	märkä 16.11.93 g	kuiva 30.11.93 g		%	märkänä						kuivana						tuore kg/m3	kuiva kg/m3	kuiva kg/m3	15% kg/m3	15% kg/m3				
						a mm	b mm	c mm	a mm	b mm	c mm	a mm	b mm	c mm												
15	MURTO	293,516	241,76	21,4																						
	L4	38,475	32,163	19,6	50,23	50,27	50,46	50,49	31,35	31,22	47,35	47,34	50,46	50,45	30,20	30,18	486	446		480						
	L3	37,042	30,632	20,9	50,31		50,52		31,09		47,32		50,43		30,18		457	418		450						
	L2	33,269	27,418	21,3	50,30	50,29	50,31	50,37	31,94	32,02	47,09	47,09	50,33	50,33	30,89	30,89	415	373		401						
	L1	33,730	27,794	21,4	50,28		50,42		32,08		47,09		50,33		30,89		422	373		401						
	LA	27,518	22,693	21,3	50,16	50,20	49,91	50,03	31,93	31,98	47,50	47,52	49,95	49,98	30,96	30,96	418	371		399						
	LB	28,194	23,284	21,1	50,23		50,15		31,98		47,53		50,00		30,96		429	389		419						
	LC	31,217	25,863	21,1	49,98	50,07	49,81	49,95	31,91	31,98	48,46	48,46	49,84	49,89	30,81	30,81	472	438		471						
	LD	30,600	25,527	20,7	50,15		50,08		32,04		48,44		49,94		30,81		459	421		453						
				20,9	49,93	50,01	49,92	50,03	26,33	26,31	48,46	48,43	50,00	49,98	25,38	25,30	444	404		434						
				20,9	50,08		50,14		26,28		48,38		49,95		25,24		444	404		434						
				20,9	49,90	49,97	50,15	50,19	26,31	26,22	47,17	47,17	50,07	50,11	25,27	25,30	444	404		434						
				20,9	50,03		50,23		26,13		47,17		50,14		25,33		444	404		434						
				20,9	50,03	50,10	50,32	50,41	26,22	26,22	46,83	46,84	50,34	50,33	25,05	25,04	444	404		434						
				20,9	50,16		50,49		26,21		46,84		50,31		25,03		444	404		434						
				20,9	50,19	50,35	50,37	50,45	26,38	26,26	47,42	47,43	50,33	50,33	25,38	25,38	444	404		434						
				20,9	50,50		50,53		26,16		47,44		50,32		25,37		444	404		434						
				20,9							232,17					223,86	444	404		434						

KOEKAPPALE		PAINO		KOST.	MITTAUS												TIHEY				uf = 26				
TUKKI no:	TUNNUS	märkä	kuiva		%	märkänä						kuivana						tuore kg/m3	kuiva kg/m3	15% kg/m3					
		17.11.93 g	30.11.93 g			a mm	b mm	c mm	a mm	b mm	c mm	a mm	b mm	c mm											
13	MURTO	345,16	282,29	22,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
	L4	39,599	32,843	20,6	50,52	50,58	50,51	50,58	33,40	33,45	47,89	48,01	50,49	50,54	32,50	32,51	463	416					448		
	L3	38,623	31,455	22,8	50,59		50,64		33,49		48,13		50,59		32,52		456	402					432		
	L2	36,802	29,865	23,2	50,54	50,53	50,29	50,26	33,37	33,33	48,11	48,11	50,19	50,18	32,46	32,42	440	390					419		
	L1	33,679	27,328	23,2	50,51		50,22		33,28		48,10		50,17		32,38		403	355					382		
	LA	36,888	29,915	23,3	50,42	50,39	49,99	49,98	33,35	33,24	47,79	47,71	49,87	49,88	32,29	32,22	425	372					400		
	LB	36,195	29,416	23,0	50,35		49,92		33,13		47,83		49,84		32,15		420	379					407		
	LC	37,725	30,805	23,0	50,14		50,23		33,24		47,59		50,13		32,27		442	392					422		
	LD	41,173	34,105	22,5	50,14	50,18	50,31	50,39	34,43	34,32	47,95	48,02	50,33	50,31	33,40	33,31	477	426					459		
					49,75	49,88	50,88	50,41	34,37	34,30	46,98	46,86	49,89	49,84	33,34	33,20	441	392					421		
					49,80	49,84	50,05	49,97	34,26	34,28	47,28	47,21	49,87	49,88	33,38	33,33									
					49,88		49,89		34,30		47,14		49,89		33,28										
					50,13	50,04	50,15	50,23	34,45	34,37	47,49	47,58	50,24	50,15	33,85	33,54									
					49,95		50,31		34,29		47,62		50,06		33,42										
				22,7	270,39						282,70						441	392							

KOEKAPPALE		PAINO		KOST.	MITTAUS												TIHEY				uf = 26				
TUKKI no:	TUNNUS	märkä	kuiva		%	märkänä						kuivana						tuore kg/m3	kuiva kg/m3	15% kg/m3					
		18.11.93 g	30.11.93 g			a mm	b mm	c mm	a mm	b mm	c mm	a mm	b mm	c mm											
12	MURTO		282,3	####	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
	4	39,252	32,153	22,1	50,85	50,57	50,74	50,86	30,70	30,70	48,33	48,19	50,59	50,53	29,84	29,84	499	443					476		
	3	36,309	29,284	24,0	50,48		50,57		30,70		48,05		50,47		29,84		466	407					438		
	2	34,977	28,062	24,6	50,44	50,35	50,64	50,59	30,85	30,80	48,09	48,07	50,54	50,51	29,81	29,86	450	396					426		
	1	32,200	25,730	25,1	50,25		50,54		30,95		48,04		50,47		29,50		416	364					392		
	A	34,347	27,424	25,2	50,21	50,14	50,67	50,81	30,85	30,85	47,30	47,29	50,53	50,50	29,71	29,84	417	363					390		
	B	35,289	28,271	24,8	50,06		50,55		30,87		47,28		50,47		29,57		430	377					406		
	C	36,889	29,663	24,8	50,08	50,03	50,81	50,55	30,63	30,58	47,48	47,41	50,51	50,45	29,84	29,53	449	403					434		
	D	38,044	30,991	24,4	49,98		50,48		30,52		47,34		50,39		29,41		465	423					455		
					50,05	50,14	50,62	50,59	32,50	32,44	47,54	47,72	50,52	50,48	31,51	31,39									
					50,22		50,58		32,38		47,89		50,44		31,26										
					50,27	50,22	50,57	50,53	32,38	32,34	47,62	47,55	50,50	50,48	31,23	31,22									
					50,17		50,49		32,32		47,48		50,45		31,20										
					50,08	50,06	50,63	50,59	32,46	32,45	46,74	46,68	50,55	50,53	31,20	31,20									
					50,03		50,55		32,44		46,61		50,50		31,19										
					50,09	50,03	50,74	50,68	32,27	32,28	46,75	46,63	50,65	50,58	31,04	31,07									
					49,96		50,62		32,28		46,51		50,50		31,09										
				24,4	252,04						243,52						449	397							

KOEKAPPALE		PAINO		KOST.	MITTAUS												TIHEY				uf = 26				
TUKKI no:	TUNNUS	märkä	kuiva		%	märkänä						kuivana						tuore kg/m3	kuiva kg/m3	15% kg/m3					
		2.12.93 g	g			a mm	b mm	c mm	a mm	b mm	c mm	a mm	b mm	c mm											
16	T3	64,242	55,476	15,8	50,98	51,05	51,17	51,15	56,28	56,25	48,60	48,64	51,09	51,07	55,00	54,88	437	407					438		
	T2	65,086	55,067	18,2	51,11		51,13		56,24		48,87		51,05		54,76		447	410					442		
	T1	63,490	53,537	18,6	50,70	50,87	51,21	51,15	56,23	56,24	48,17	48,08	51,14	51,07	54,80	54,64	436	400					430		
	TA	52,083	43,950	18,5	50,84		51,08		56,24		47,99		50,99		54,48		459	418					450		
	TB	51,424	43,644	17,8	50,90	50,84	51,07	51,04	56,07	56,13	49,09	48,94	50,98	50,95	53,92	53,74	454	416					448		
	TC	52,077	44,996	15,7	50,78		51,00		56,19		48,79		50,91		53,56		457	421					453		
	TD	12,914	11,659	10,8	50,67	50,73	50,90	50,84	43,87	43,91	48,67	48,72	50,82	50,78	42,75	42,43	433	407					438		
					50,78		50,78		43,95		48,77		50,70		42,10										
					50,89	50,72	51,09	51,07	43,97	43,96	48,80	48,89	51,01	51,01	43,14	42,86									
					50,75		51,05		43,94		48,97		51,01		42,58										
					50,77	50,84	51,24	51,20	11,48	11,46	49,50	49,55	51,16	51,10	11,38	11,32									
					50,90		51,15		11,48		49,60		51,04		11,28										
				17,2	311,85						301,87						447	411							

KOEKAPPALE		PAINO		KOST.	MITTAUS												TIHEY				uf = 26	
TUUKI no:	TUNNUS	märkä g	kuiva g		%	märkänä						kuivana						tuore kg/m3	kuiva kg/m3	kg/m3		15% kg/m3
						a mm	b mm	c mm	a mm	b mm	c mm	a mm	b mm	c mm	a mm	b mm	c mm					
27	T5	59,959	52,429	14,4	51,13	51,06	51,20	51,13	46,02	46,06	49,08	48,97	51,14	51,07	45,18	45,10	499	465		500		
	T4	61,697	52,332	17,9	50,98		51,06		46,07		48,88		51,00		45,01		520	478		514		
					51,01	50,94	50,80	50,82	46,00	45,97	48,52	48,43	50,54	50,55	44,98	44,75						
					50,87		50,84		45,94		48,34		50,55		44,51							
	T3	72,511	61,044	18,8	50,81	50,73	50,37	50,36	45,99	46,00	46,20	48,14	50,31	50,28	44,49	44,40	617	568		611		
					50,64		50,35		46,01		48,08		50,25		44,31							
	T2	81,152	67,521	20,2	50,77	50,71	50,56	50,48	45,99	46,01	46,01	47,98	50,54	50,47	44,34	44,23	689	630		678		
					50,84		50,40		46,03		47,95		50,40		44,12							
	T1	77,826	65,000	19,7	50,51	50,51	50,75	50,58	45,85	45,88	48,72	48,74	50,70	50,56	44,08	43,79	664	602		648		
50,51						50,40		45,91		48,75		50,42		43,49								
TA	71,615	60,225	18,9	50,37	50,40	50,74	50,63	45,98	45,98	48,60	48,67	50,70	50,84	44,37	44,04	611	555		597			
				50,42		50,52		45,98		48,74		50,57		43,71								
TB	71,399	60,613	17,8	50,75	50,88	51,07	50,94	45,92	45,95	48,37	48,30	51,02	50,91	44,47	44,45	602	555		597			
				50,61		50,80		45,98		48,23		50,80		44,43								
TC	14,477	12,894	12,3	50,58	50,53	51,33	51,15	11,18	10,63	49,04	48,97	51,24	51,08	10,92	10,39	527	496		534			
				50,49		50,98		10,07		48,89		50,91		9,86								
				18,0	332,44												321,14	598	548		590	

KOEKAPPALE		PAINO		KOST.	MITTAUS												TIHEY				uf = 26	
TUUKI no:	TUNNUS	märkä g	kuiva g		%	märkänä						kuivana						tuore kg/m3	kuiva kg/m3	kg/m3		15% kg/m3
						a mm	b mm	c mm	a mm	b mm	c mm	a mm	b mm	c mm	a mm	b mm	c mm					
P14	(R2)	330,370	272,44	21,3		50,28		50,22	298,00	47,32	47,70	47,51	50,24	50,30	284,00	284,00	442	401		432		

KOEKAPPALE		PAINO		KOST.	MITTAUS												TIHEY				uf = 26	
TUUKI no:	TUNNUS	märkä g	kuiva g		%	märkänä						kuivana						tuore kg/m3	kuiva kg/m3	kg/m3		15% kg/m3
						a mm	b mm	c mm	a mm	b mm	c mm	a mm	b mm	c mm	a mm	b mm	c mm					
P12	(R6)	341,723	278,25	22,8	50,79	50,83	50,28	50,35	279,50	279,00	46,40	47,12	50,86	50,78	270,00	269,50	479	432		464		
		4	38,420	32,165	19,4	50,87		50,43		278,50		47,83		50,89		269,00		456	418		450	
						50,37	50,81	32,44	32,81	50,77	50,76	47,99	47,97	50,70	50,89	31,66	31,64					
						50,84		33,17		50,75		47,95		50,67		31,62						
		3	38,680	31,252	23,8	50,42	50,63	33,65	33,69	50,80	50,78	47,85	47,78	50,62	50,63	32,49	32,51	447	398		428	
						50,84		33,72		50,75		47,67		50,64		32,53						
		2	38,881	31,317	24,2	50,48	50,82	33,67	33,66	50,73	50,74	48,13	48,05	50,50	50,54	32,67	32,69	450	395		424	
						50,75		33,65		50,75		47,97		50,58		32,70						
		1	35,719	28,688	24,5	50,86	50,69	33,54	33,56	50,77	50,79	47,97	48,01	50,63	50,61	32,34	32,32	414	365		393	
						50,51		33,57		50,81		48,04		50,59		32,30						
		A	33,497	26,924	24,4	50,85	50,88	30,19	30,21	50,84	50,83	48,56	48,78	50,68	50,69	29,32	29,32	431	372		400	
						50,50		30,22		50,82		48,99		50,69		29,31						
		B	35,005	28,218	24,1	50,70	50,53	30,19	30,18	50,85	50,87	47,49	47,42	50,81	50,80	29,10	29,10	451	403		433	
						50,36		30,18		50,89		47,34		50,78		29,09						
		C	35,577	28,844	23,3	50,29	50,42	30,14	30,10	50,75	50,77	47,09	47,04	50,70	50,72	29,10	29,14	462	415		446	
50,55						30,06		50,78		48,98		50,73		29,18								
D	40,090	33,786	18,7	50,20	50,10	33,29	32,92	50,87	50,90	47,30	47,27	50,85	50,78	32,18	31,94	478	441		474			
				50,00		32,54		50,93		47,24		50,70		31,89								
				22,8	406,43												248,64	448	401		431	

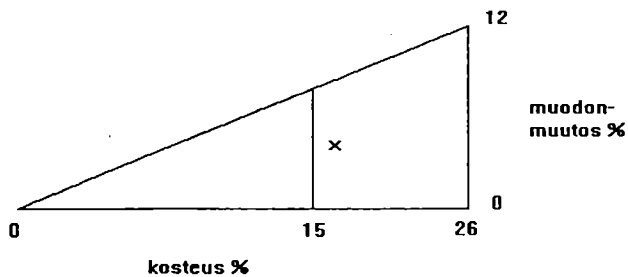
KOEKAPPALE		PAINO		KOST.
KPL no:	TUNNUS	2.12.93 g	30.12.93 g	
9		925,470	798,56	15,9
13		936,410	802,74	16,7
15		930,530	803,85	15,8
15p		981,570	848,81	15,6
15v		989,740	852,45	16,1
16p		1003,880	861,57	16,5
26p		1084,050	936,14	15,8
27		1065,600	917,69	16,1
27p		1076,340	931,95	15,5

KAAVAT:

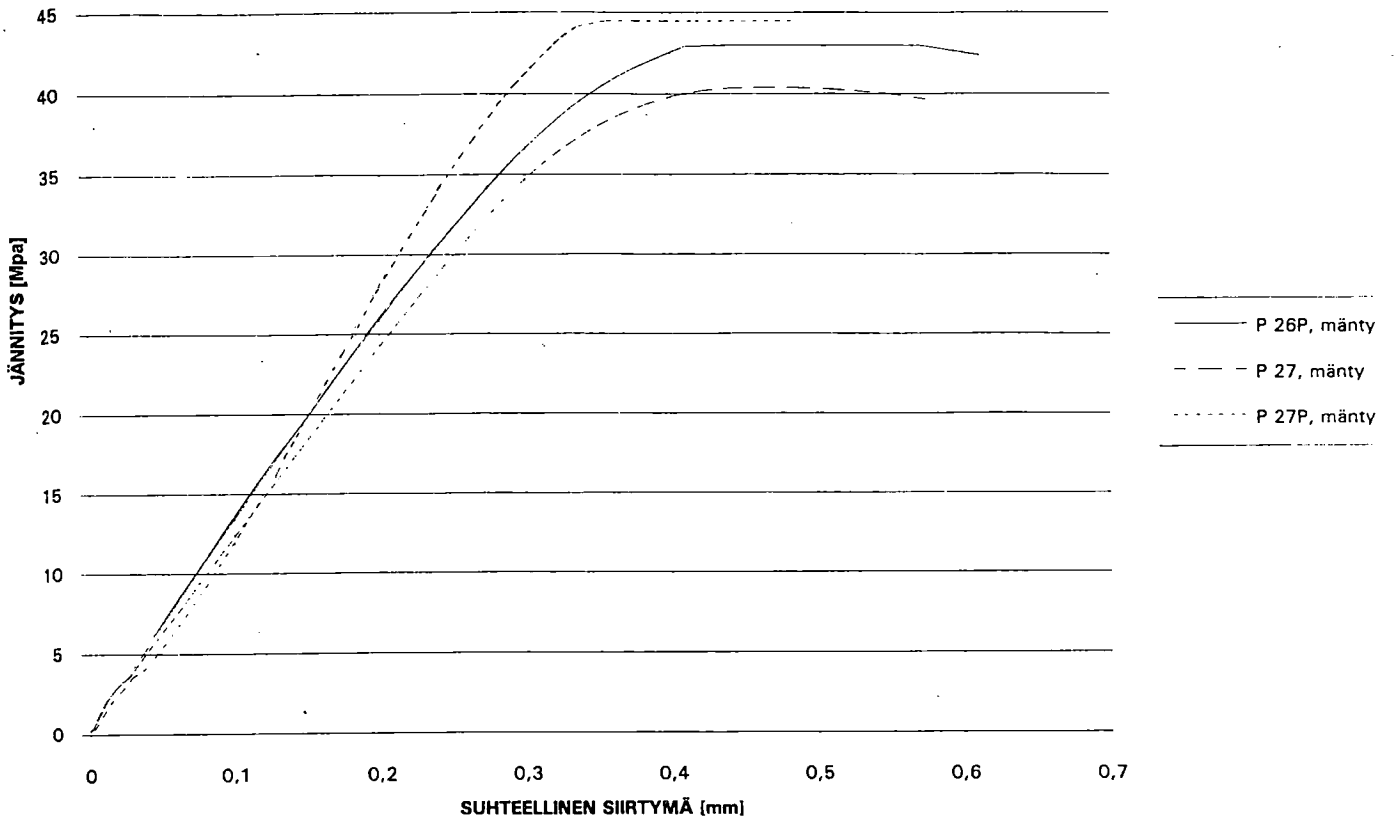
$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$\rho_{15} = \frac{m_{15}}{V_{15}} = \frac{1.15 \cdot m_0}{1.069 \cdot V_0}$$

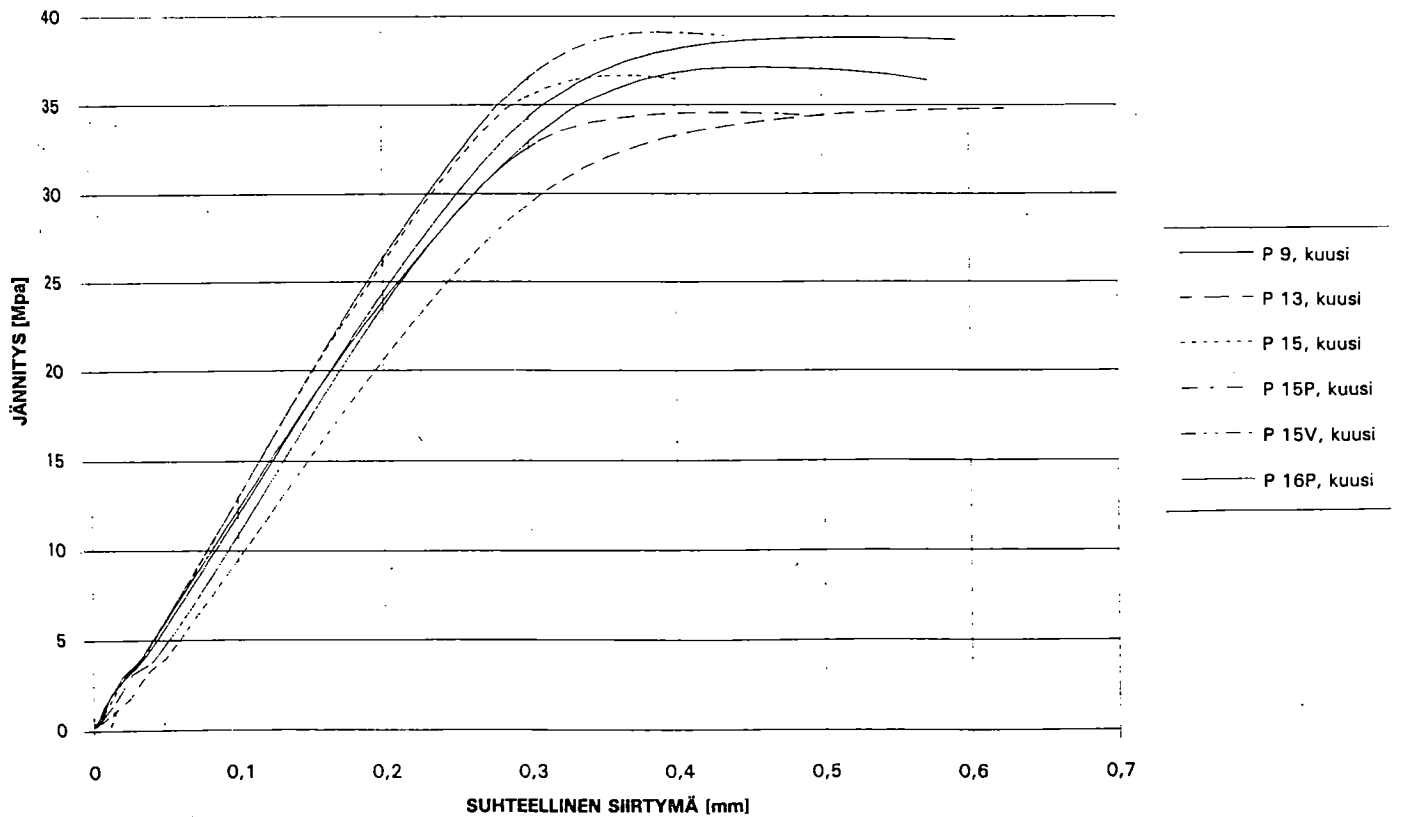
$$x = \frac{12}{26} \cdot 15$$



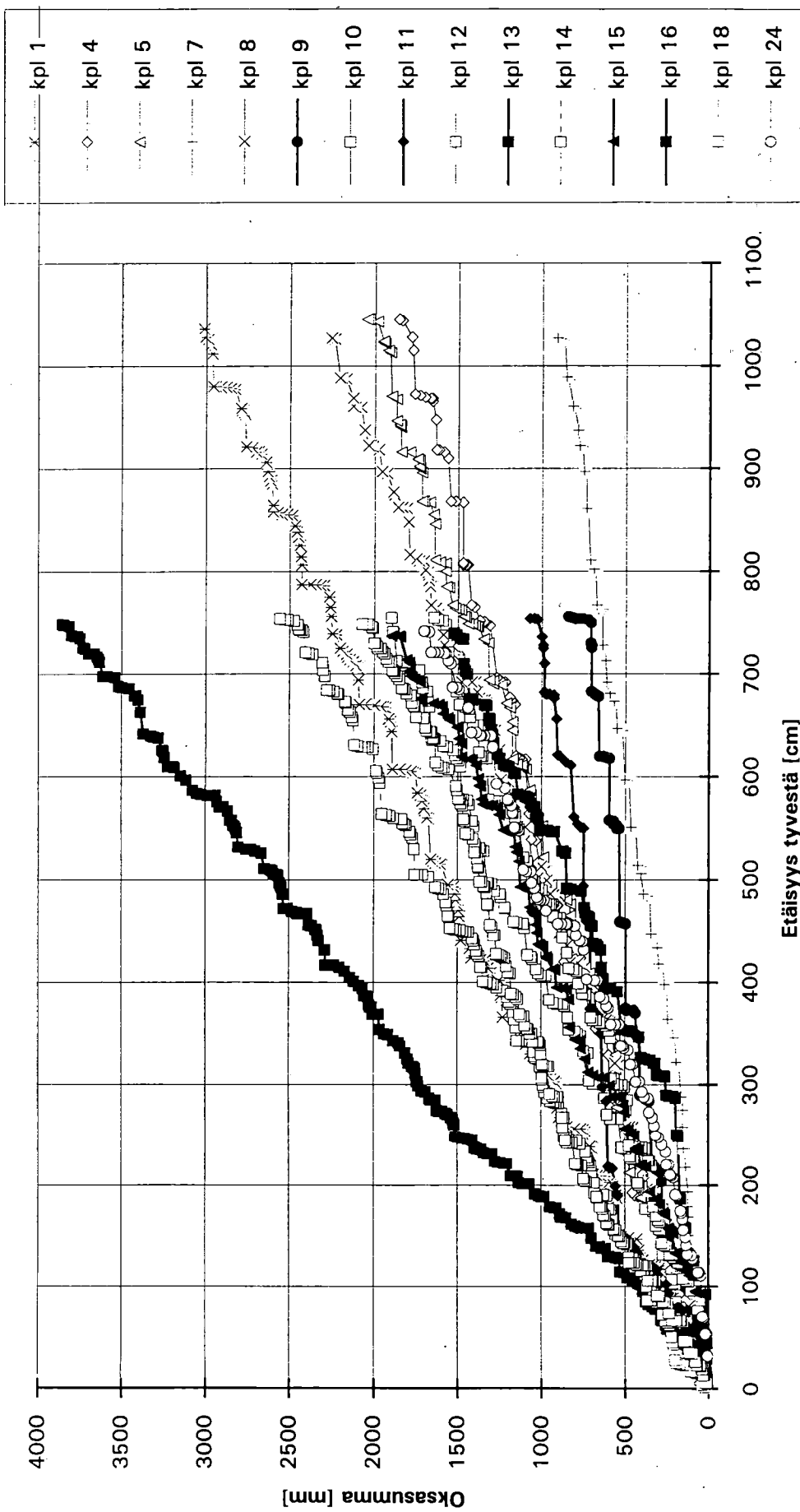
Puristuskoekappaleiden jännitys-muodonmuutoskäyrä



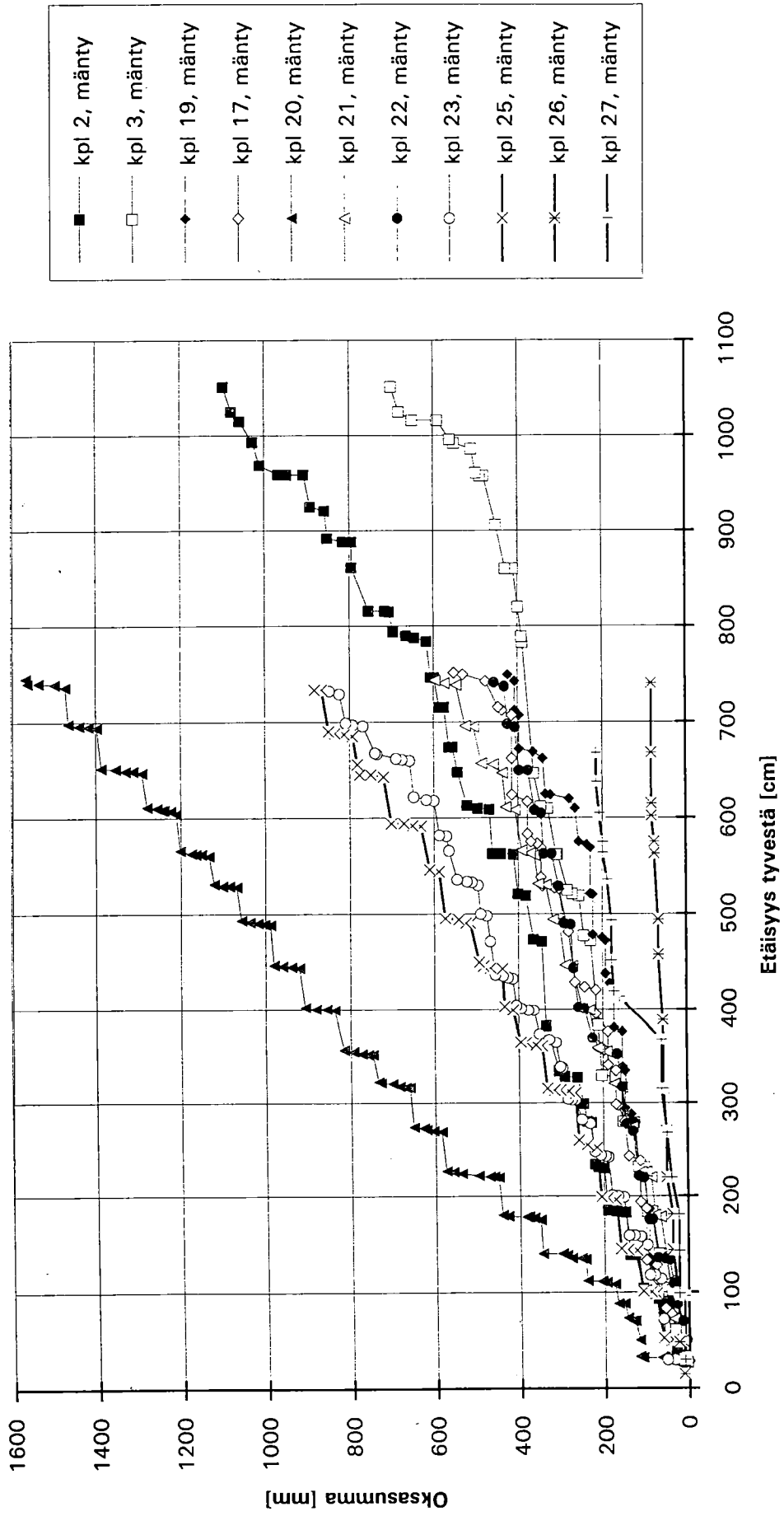
Puristuskoekappaleiden jännitys-muodonmuutoskäyrä

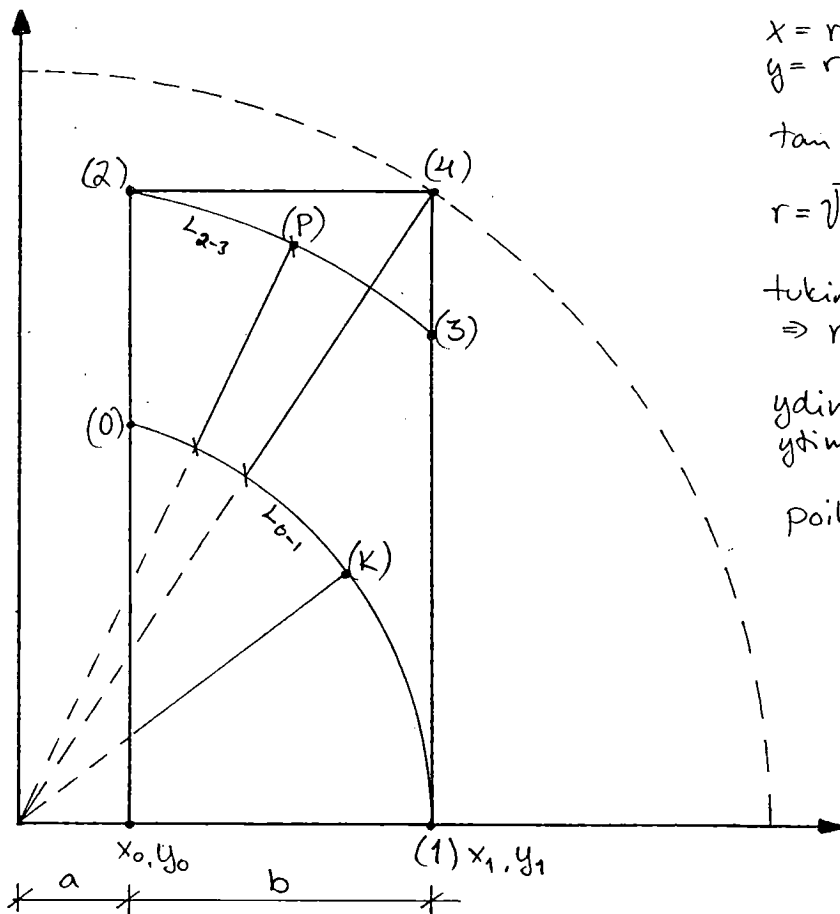


Kuusikappaleiden oksasummat



Mäntykappaleiden oksasummat





$$x = r \cdot \cos \varphi$$

$$y = r \cdot \sin \varphi$$

$$\tan \varphi = \frac{y}{x}, \quad L = \varphi r$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \frac{x}{\cos \varphi} = \frac{y}{\sin \varphi}$$

tukin halkaisija d
 $\Rightarrow r_{\max} = \frac{d}{2}$

ydinlappeen etäisyys
 ytimestä $= a$

poikkeileikkauksen leveys $= b$

$$\left. \begin{array}{l} x_1 = a+b \\ r_1 = a+b \end{array} \right\} \Rightarrow \varphi_1 = a \cos \frac{x_1}{r_1} = 0$$

$$y_1 = 0$$

$$\left. \begin{array}{l} x_0 = a \\ r_0 = r_1 \end{array} \right\} \Rightarrow \varphi_0 = a \cos \frac{x_0}{r_0}$$

$$y_0 = r_0 \cdot \sin \varphi_0$$

$$\left. \begin{array}{l} x_4 = x_1 = a+b \\ r_4 = \frac{a}{2} \end{array} \right\} \Rightarrow \varphi_4 = a \cos \frac{x_4}{r_4}$$

$$y_4 = r_4 \cdot \sin \varphi_4$$

$$\left. \begin{array}{l} x_2 = x_0 = a \\ y_2 = y_4 \end{array} \right\} \Rightarrow \varphi_2 = a \tan \frac{y_2}{x_2}$$

$$r_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}$$

$$\left. \begin{array}{l} x_3 = x_1 = a+b \\ r_3 = r_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \varphi_3 = a \cos \frac{x_3}{r_3}$$

$$y_3 = r_3 \cdot \sin \varphi_3$$

$$L_{0-1} = \varphi_0 r_0$$

$$L_{2-3} = (\varphi_2 - \varphi_3) r_2$$

$$r_{KP} = r_2 - r_0$$

$$r_{K4} = r_4 - r_0$$

$$r_k = r_0$$

$$\varphi_k = \frac{1}{2} \varphi_0$$

$$x_k = r_k \cdot \cos \varphi_k = r_0 \cdot \cos \frac{\varphi_0}{2}$$

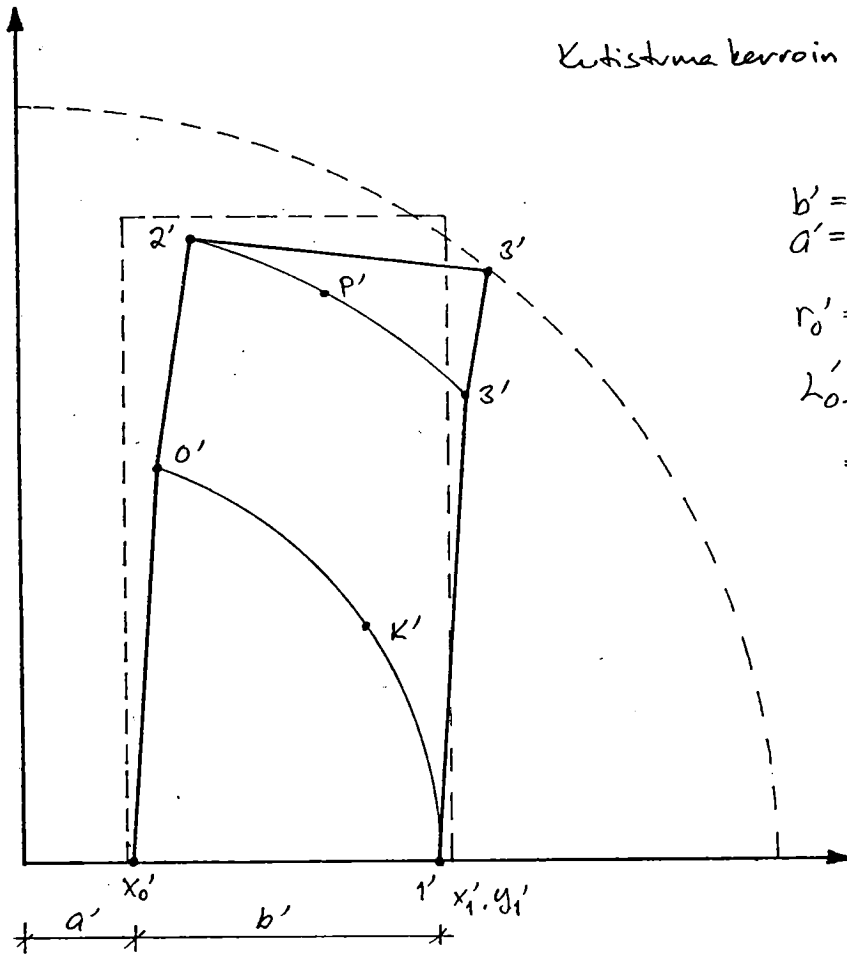
$$y_k = r_k \cdot \sin \varphi_k = r_0 \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2}$$

$$r_p = r_2$$

$$\varphi_p = \varphi_3 + \frac{1}{2} (\varphi_2 - \varphi_3)$$

$$x_p = r_p \cdot \cos \varphi_p$$

$$y_p = r_p \cdot \sin \varphi_p$$



Kutistuma kerroin säteen suuntaan k_R
Tangentin suuntaan k_T

$$b' = k_R b$$

$$a' = a + \frac{1}{2}(b - b')$$

$$r_0' = a' + b'$$

$$L_{0-1} = k_T L_{0-1} = \varphi_0' r_0'$$

$$\Rightarrow \varphi_0' = \frac{L_{0-1}}{r_0'}$$

$$x_0' = r_0' \cdot \cos \varphi_0'$$

$$y_0' = r_0' \cdot \sin \varphi_0'$$

$$x_1' = a' + b'$$

$$y_1' = 0$$

$$r_1' = a' + b' = r_0'$$

$$\varphi_1' = 0$$

$$\varphi_p' = \varphi_p - d_p$$

$$r_p' = r_0' + r_{kp}'$$

$$x_p' = r_p' \cdot \cos \varphi_p'$$

$$y_p' = r_p' \cdot \sin \varphi_p'$$

$$L_{2-3} = k_T L_{2-3} = \varphi_2' r_2'$$

$$r_2' = r_3' = r_p'$$

$$\varphi_2' = \varphi_p' + \frac{1}{2} \frac{L_{2-3}}{r_2'}$$

$$x_2' = r_2' \cdot \cos \varphi_2'$$

$$y_2' = r_2' \cdot \sin \varphi_2'$$

$$\varphi_3' = \varphi_p' - \frac{1}{2} \frac{L_{2-3}}{r_2'}$$

$$x_3' = r_3' \cdot \cos \varphi_3'$$

$$y_3' = r_3' \cdot \sin \varphi_3'$$

$$\varphi_4' = \varphi_4 - d_4$$

$$r_4' = r_0' + r_{k4}'$$

$$x_4' = r_4' \cdot \cos \varphi_4'$$

$$y_4' = r_4' \cdot \sin \varphi_4'$$

$$\varphi_k' = \frac{1}{2} \varphi_0'$$

$$r_k' = r_0'$$

$$x_k' = r_k' \cdot \cos \varphi_k' = r_0' \cdot \cos \frac{\varphi_0'}{2}$$

$$y_k' = r_k' \cdot \sin \varphi_k' = r_0' \cdot \sin \frac{\varphi_0'}{2}$$

Kulmanmuutos: $\varphi' = \frac{k_{TL}}{k_{RR}}$

$$d_0 = \varphi_0 - \varphi_0'$$

$$d_k = \frac{1}{2} d_0$$

$$d_p = \frac{\varphi_p}{\varphi_0} d_0$$

$$d_4 = \frac{\varphi_4}{\varphi_0} d_0$$

$$r_{kp}' = k_{RR} (r_2 - r_0)$$

$$r_{k4}' = k_{RR} (r_4 - r_0)$$

Rajoitukset $\varphi_p < \varphi_0$

$$\varphi_4 < \varphi_0$$

PUUN POIKKILEIKKAUKSEN KÄYRISTYMINEN KUIVAUKSEN AIKANA

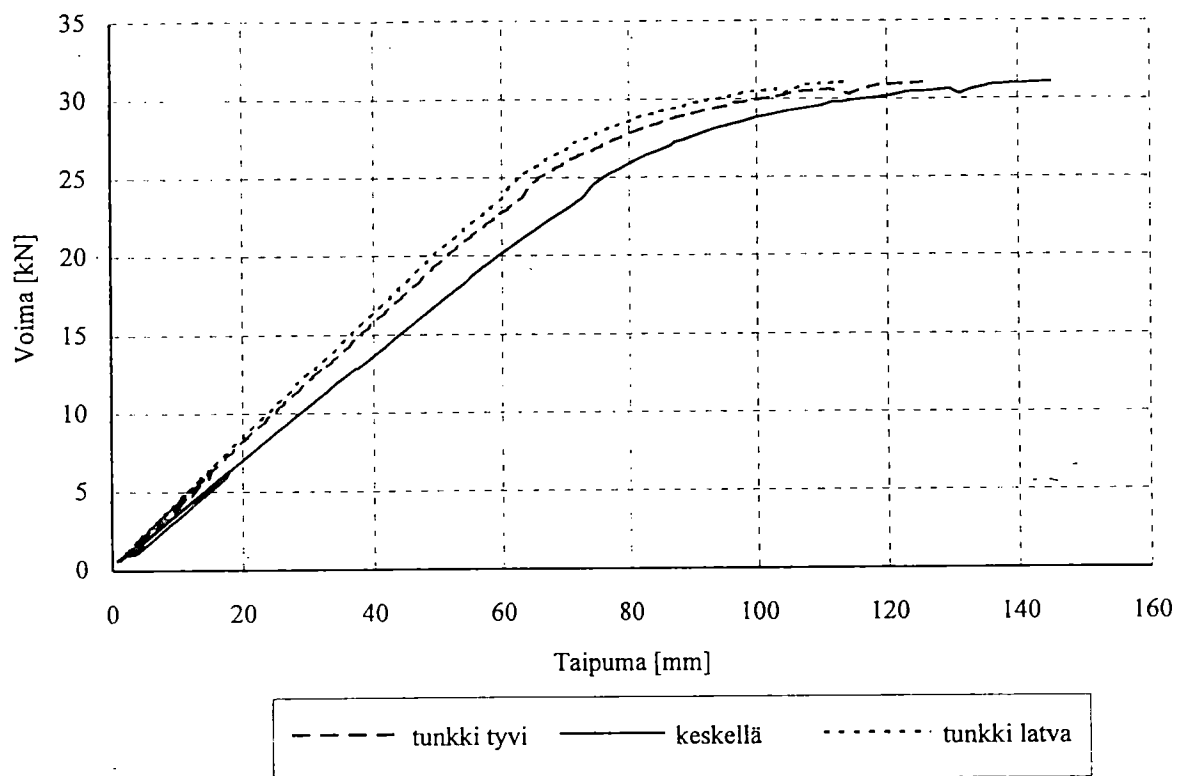
Puunsyiden kyll.piste 27 %
Loppukosteus 7,4 %

Kutistuma kyllästymispisteestä kuivaksi säteen suunt. 4 % kost 2,90 %
tangentin suunt. 8 % 5,81 %

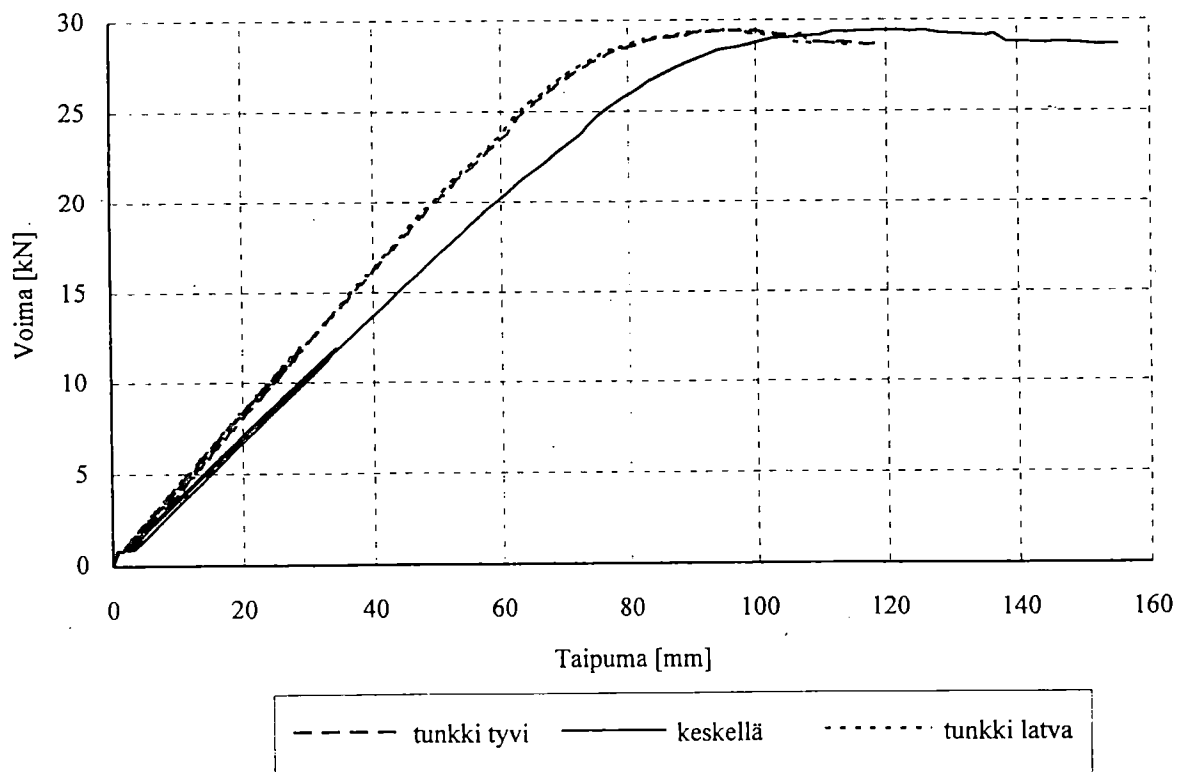
	1 AT	1 AL	1 YT	1 YL	2 AT	2 AL	2 YT	2 YL	3 AT	3 AL	3 YT	3 YL	4 AT	4 AL	4 YT	4 YL	5 AT	5 AL	5 YT	5 YL	6 AT	6 AL	6 YT	6 YL
Etäisyys Ytimestä	a	mm	30	50	10	10	30	30	30	30	50	50	30	30	50	50	50	50	10	10	10	10	30	30
Kappaleen paksuus	b	mm	75	75	100	100	100	100	100	100	50	50	100	100	50	50	50	50	75	75	50	50	50	50
Kappaleen korkeus	h	mm	334	278	339	171	387	205	251	203	283	162	231	203	191	156	329	173	441	217	265	199	383	208
Kappaleen kosteus		%																						
SKAAR																								
$\frac{d}{h} = 0.005 (S_t - S_r) \tan(h / 2r)$																								
kappaleen paksuus	t	mm	75,0	75,0	100,0	100,0	100,0	50,0	100,0	100,0	50,0	50,0	100,0	100,0	50,0	50,0	50,0	50,0	75,0	75,0	50,0	50,0	50,0	50,0
kappaleen leveys	w	mm	334,0	278,0	339,0	171,0	387,0	205,0	251,0	203,0	283,0	162,0	231,0	203,0	191,0	156,0	329,0	173,0	441,0	217,0	265,0	199,0	383,0	208,0
ulkopinnan et. ytimestä	r	mm	105,0	105,0	110,0	110,0	130,0	80,0	130,0	130,0	100,0	100,0	130,0	130,0	100,0	100,0	100,0	100,0	85,0	85,0	60,0	60,0	80,0	80,0
r/w =			0,314	0,669	0,45	1,042	0,324	0,643	0,39	0,518	0,64	0,353	0,563	0,64	0,524	-0,641	0,304	0,578	0,193	0,392	0,226	0,302	0,209	0,385
st-sr =		%	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Koveruus (Skaar)	d	mm	6,74	2,02	6,75	2,26	7,58	3,72	3,85	2,69	5,41	2,21	3,36	2,69	2,91	2,07	6,74	2,47	10,61	3,93	6,07	4,09	9,00	3,81
Yksinkertaistettu tapa	d	mm	6,93	1,95	6,61	2,11	7,65	3,83	3,76	2,59	5,77	2,24	3,25	2,59	3,00	2,10	7,29	2,52	10,86	3,82	6,22	4,10	9,77	3,92
Mitattu koveruus	d	mm	6,83	2,15	7,53	2,46	7,84	4,33	4,25	4,82	4,55	2,45	2,52	1,88	2,36	2,21	6,33	2,27	10,97	2,81	8,09	5,15	6,20	3,36
Ero Skaariin		%	1,3	6,2	10,4	8,1	3,3	14,0	9,3	44,2	-18,9	10,0	-33,2	-43,2	-23,4	6,5	-6,5	-8,7	3,3	-40,0	24,9	20,5	-45,2	-13,3
Ero yksinkert. malliin		%	-1,5	9,3	4,8	27,3	12,2	14,2	11,5	46,3	-26,8	8,6	-29,0	-37,8	-27,1	5,0	-15,2	-11,0	1,0	-35,9	23,1	20,4	-57,6	-16,7

" + / - " merkki = > todellinen / laskettu on suurempi

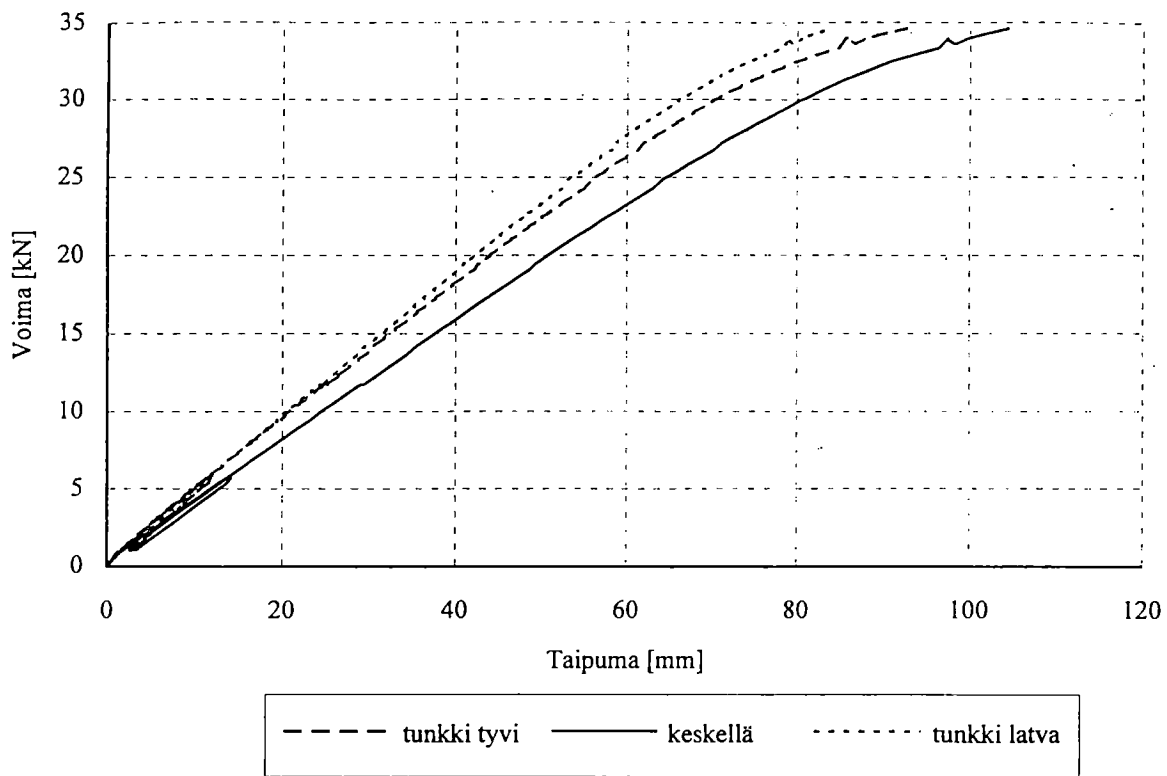
Palkki P 9



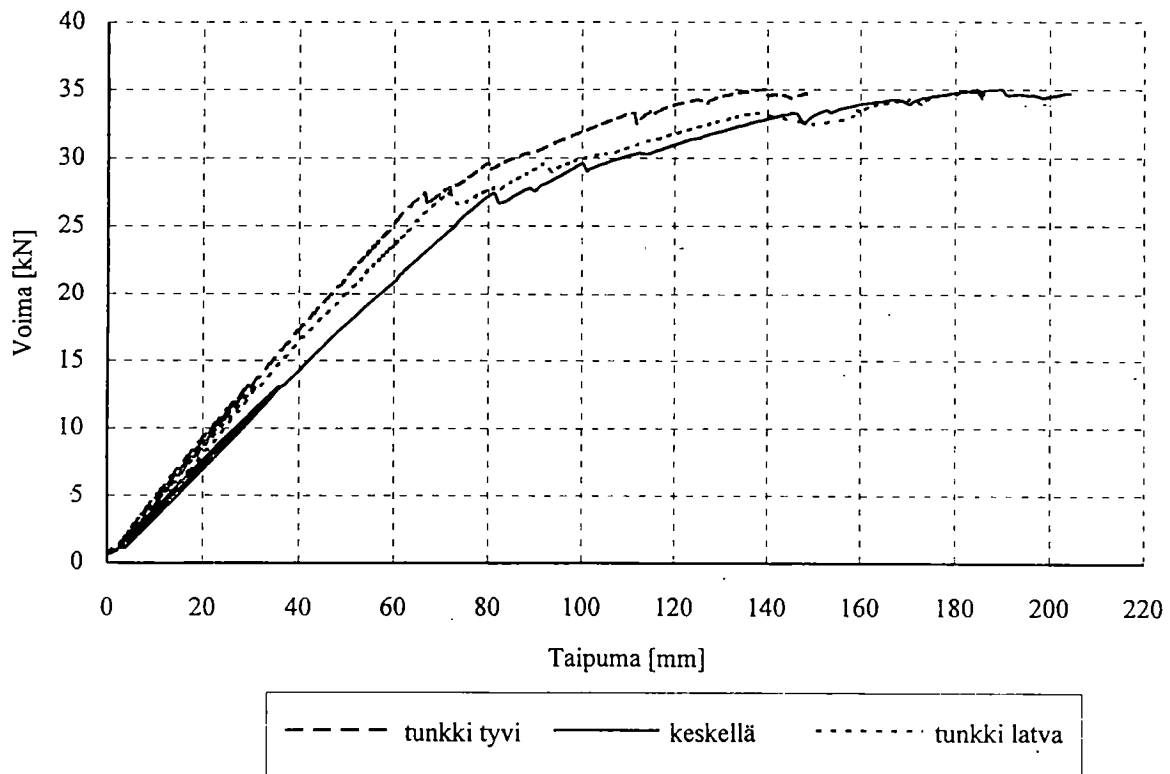
Palkki P 11



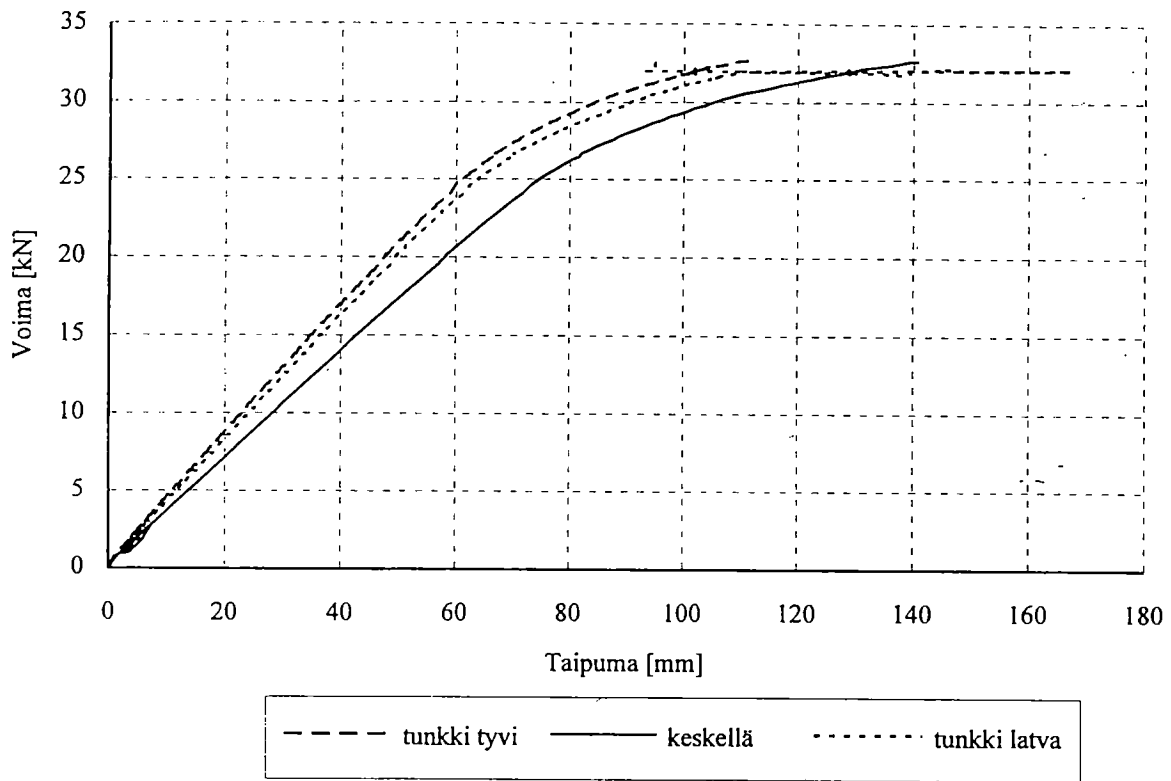
Palkki P 13



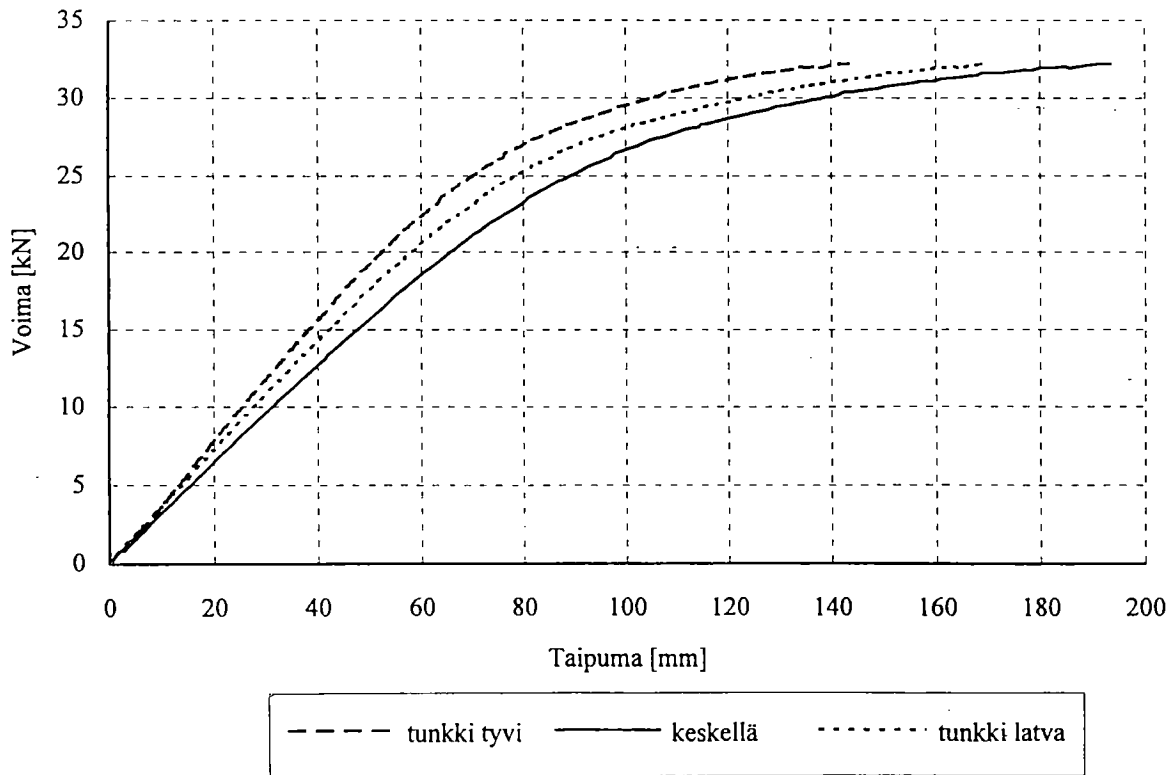
Palkki P 25



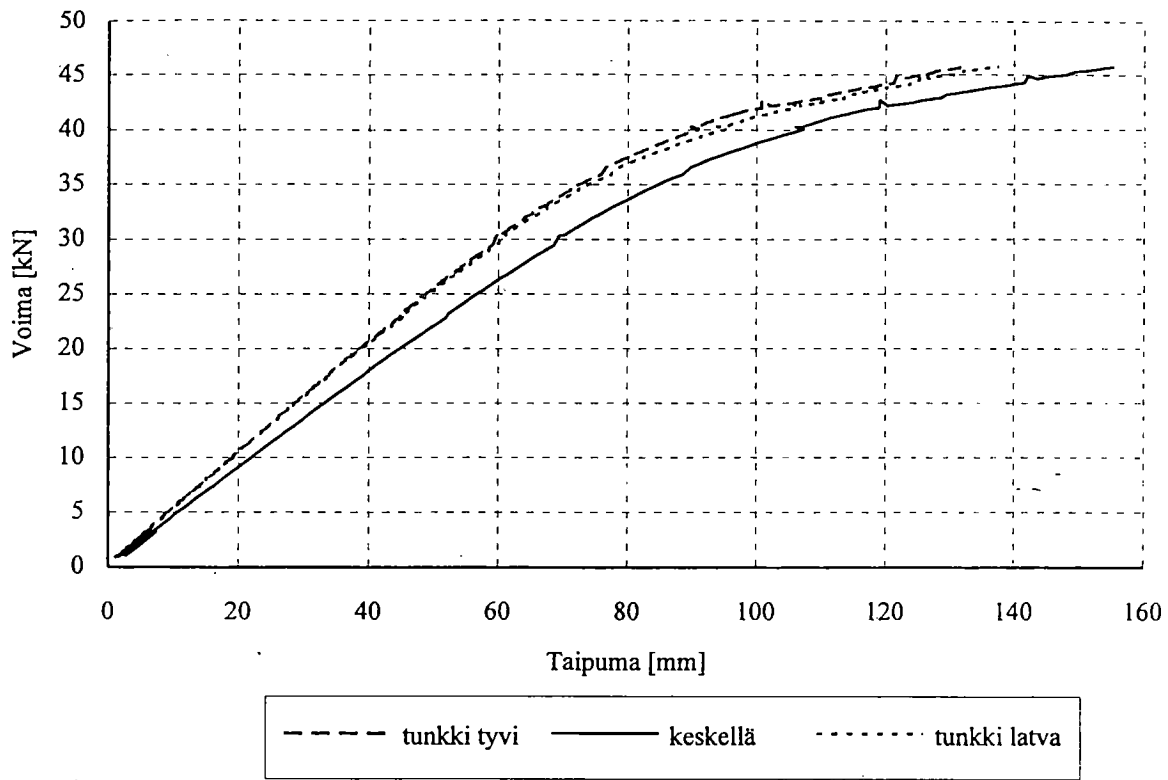
Palkki P 15



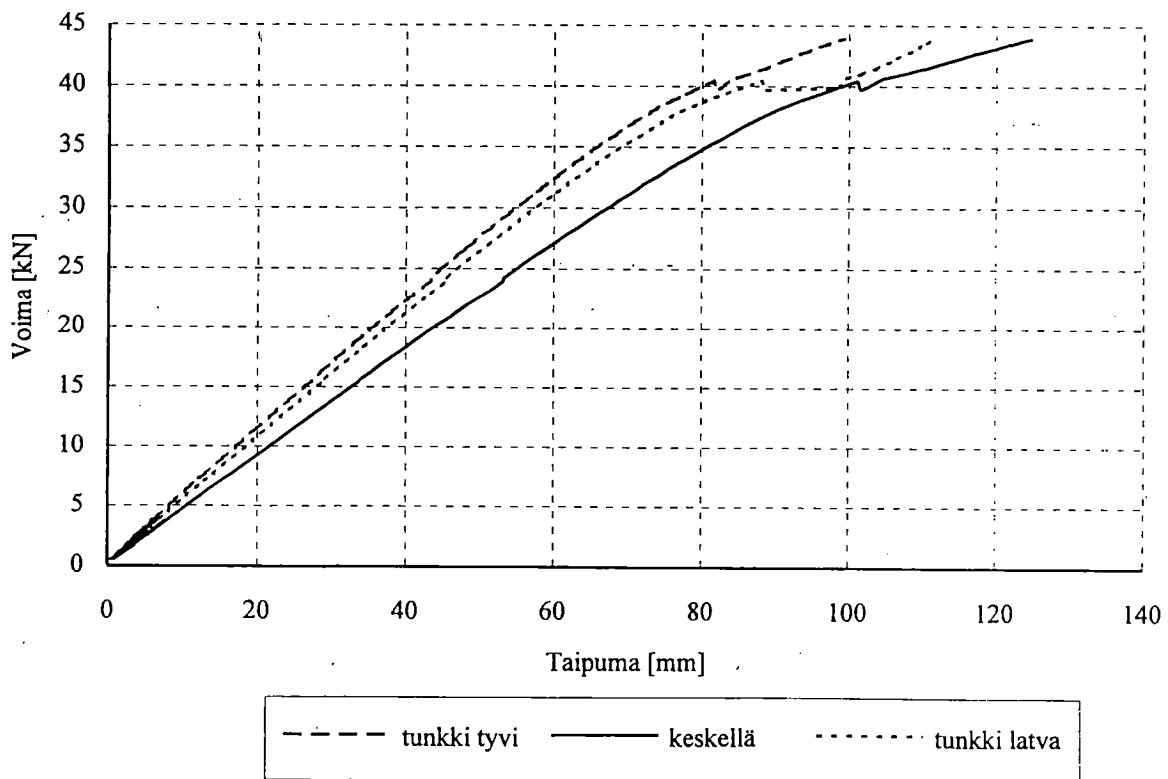
Palkki P 16



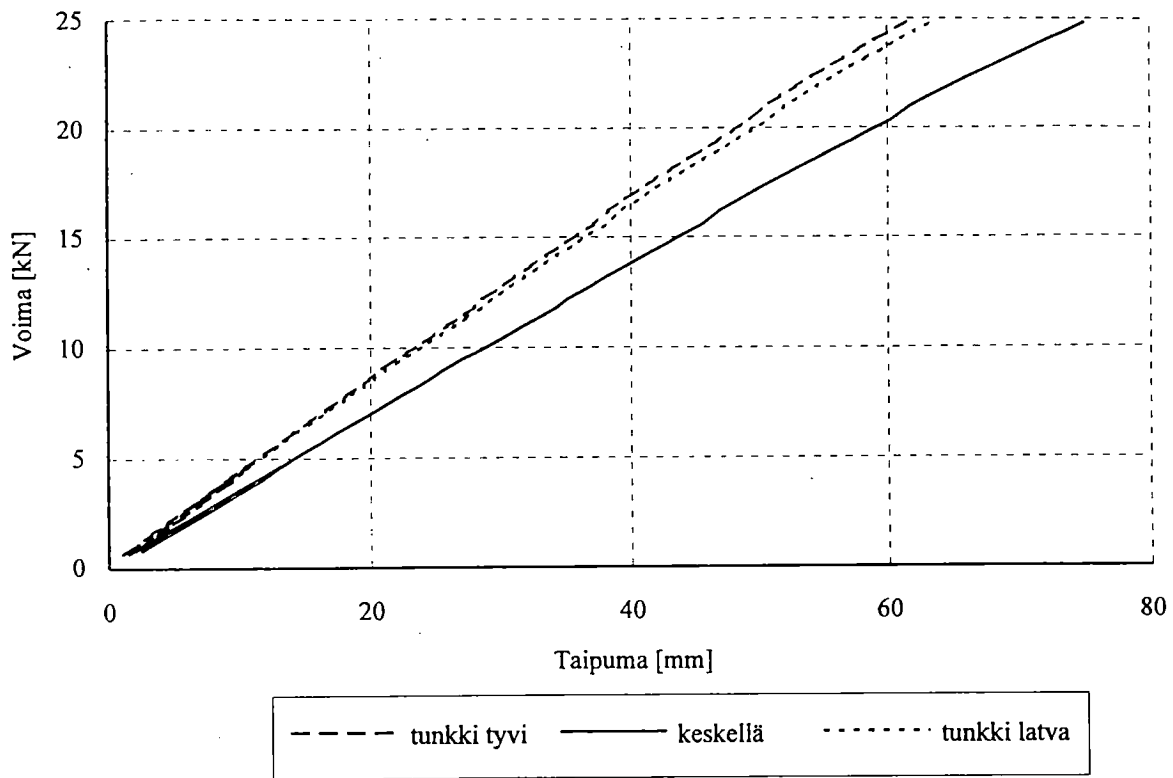
Palkki P 27



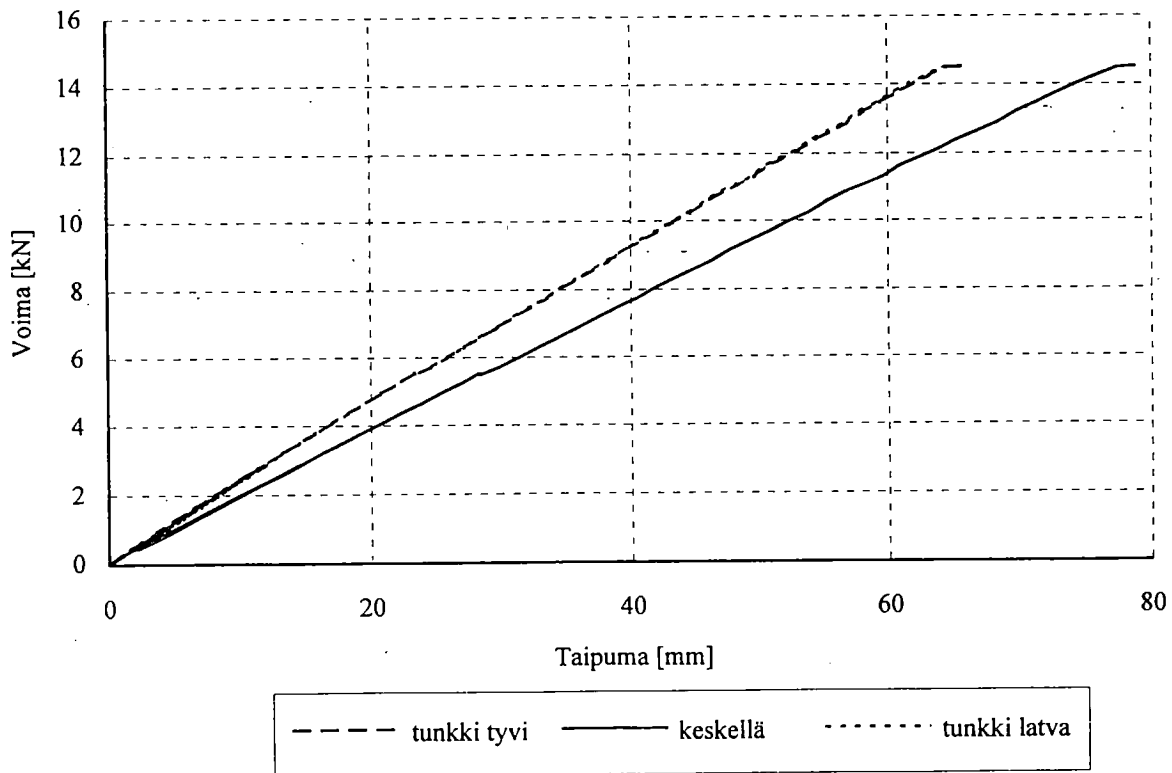
Palkki P 26

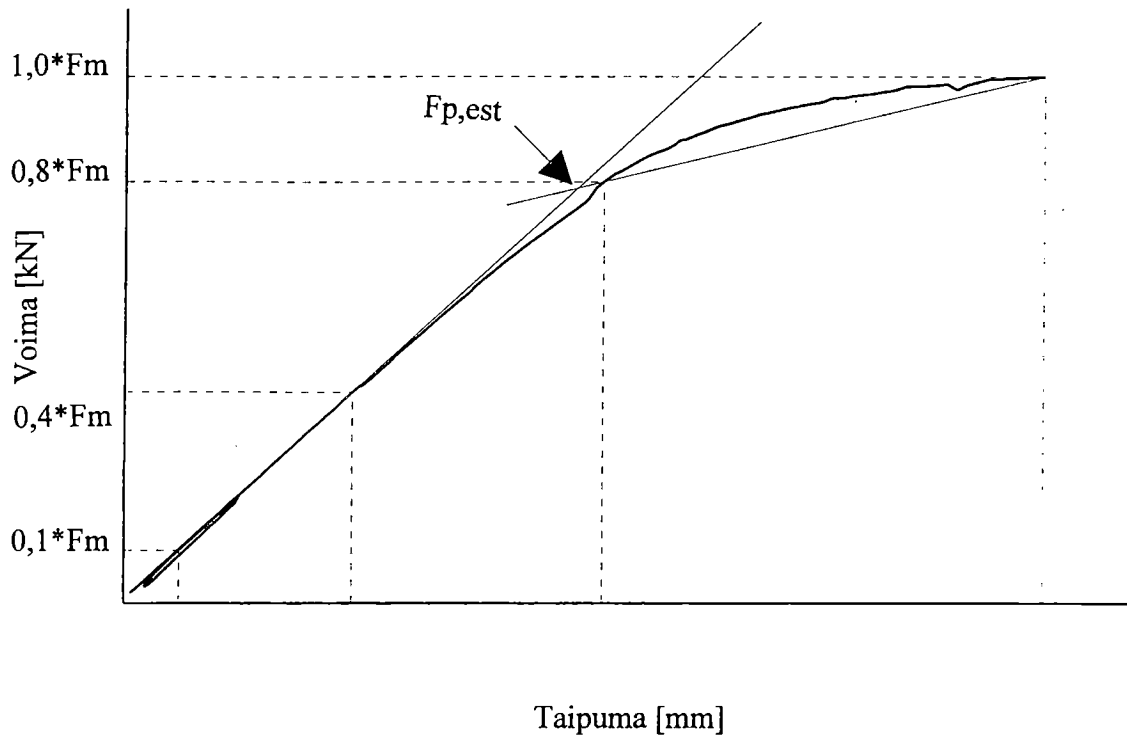


Palkki P 12



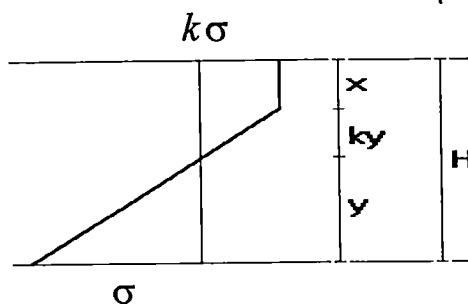
Palkki P 14





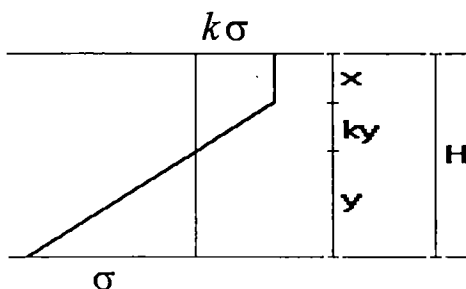
Laskenta suoritettu voima-siirtymäkäyrän taitepisteen perusteella (Fp)

Koekappale no:	P 9	P 11	P 15	P 16	P 26	T 30
	kuusi	kuusi	kuusi kiilapalkki	kuusi kiilapalkki	mänty kiilapalkki	aikalk. C kost.lk 3
Koekappaleen mitat:						
leveys	b = 102 mm	98	99	102	99	100
korkeus	H = 298 mm	299	290	279	312	300
Kuivatiheys	$\rho_0 = 390$ kg/m ³	386	404	411	548	
Plast. kuorma	Fp = 24,94 kN	24,70	25,00	20,51	30,71	16,50
Murtokuorma	Fm = 31,07 kN	29,53	32,67	32,22	44,03	17,25
Murtomomentti	Mu = 62,133 kNm	59,0584	65,34	64,44	88,05	34,50
Taivutuslujuus (kimm.)	$f_b = 41,16$ MPa	40,44	47,09	48,70	54,82	23,00
Puristusjännitys	$\sigma_c = 23,41$ MPa	19,86	24,56	27,23	31,56	22,00
Vetojännitys	$\sigma_t = 52,00$ MPa	62,61	66,17	62,67	68,40	15,00
Kimmomoduli	E = 11759 MPa	12161	11836	11467	12645	6000
Kosteus	u = 22,8 %	21,8	21,4	21,4	20	
JÄNNITYSTEN LASKENTA						
Voimien resultantti = 0						
=>						
Vetojännitys	$\sigma = 52,00$ MPa	62,61	66,17	62,67	68,40	25,23
	k = 0,4501	0,3172	0,3712	0,4344	0,4614	1,4667
Neutraaliakseli	y = 127,58 mm	109,324	114,502	117,815	134,806	144,631
Puristusvyöhyke (mitattu koekappaleista)	x = 113 mm	155	133	110	115	
Murtomonentti	Mu = 62,1 kNm	59,1	65,3	64,4	88,1	34,5
Myötömomentti	Mp = 35,3 kNm	29,0	34,1	36,0	50,7	55,5



Laskenta suoritettu voima-siirtymäkäyrän taitepisteen ($F_{p,est}$) ja mitatun purist.kork x avulla

Koekappale no:	P 9	P 11	P 13	P 15	P 16	P 25	P 26	P 27
	kuusi	kuusi	kuusi	kuusi kiilapalkki	kuusi kiilapalkki	mänty	mänty kiilapalkki	mänty kiilapalkki
Koekappaleen mitat:								
leveys	b = 102 mm	98	146	99	102	125	99	101
korkeus	H = 298 mm	299	303	290	279	278	312	310
Kuivatiheys	$\rho_0 = 390$ kg/m ³	386	392	404	411	468	548	548
Plast. kuorma	$F_p = 24,49$ kN	23,05	26,34	25,43	24,75	26,85	33,65	35,01
Murtokuorma	$F_m = 31,07$ kN	29,53	34,68	32,67	32,22	35,03	44,03	45,80
Murtomomentti	$M_u = 62,13$ kNm	59,06	69,36	65,34	64,44	70,06	88,05	91,60
Myötömom.	$M_y = 48,98$ kNm	46,11	52,68	50,87	49,51	53,71	67,31	70,02
Taivutuslujuus (kimm.)	$f_b = 41,16$ MPa	40,44	31,05	47,09	48,70	43,51	54,82	56,63
Puristusjännitys	$\sigma_c = 23,41$ MPa	19,86	29,80	24,56	27,23	30,67	31,56	29,55
Vetojännitys	$\sigma_t = 52,00$ MPa	62,61	31,07	66,17	62,67	46,91	68,40	79,51
Kimmomoduli	E = 11759 MPa	12161	9012	11836	11467	12424	12645	12372
Kosteus	u = 22,8 %	21,8	22,3	21,4	21,4	21,5	20	20
JÄNNITYSTEN LASKENTA								
Voimien resultantti = 0								
=>								
Vetojännitys	$\sigma = 52,00$ MPa	62,61	31,07	66,17	62,67	46,91	68,40	79,51
	k = 0,4501	0,3172	0,9591	0,3712	0,4344	0,6538	0,4614	0,3717
Neutraaliakseli	y = 127,58 mm	109,3	151,4	114,5	117,8	132,9	134,8	122,5
	mm							
Puristusvyöhyke (mitattu koekappaleista)	x = 113	155	100	133	110	58	115	142
	113							
Murtomomentti	$M_u = 62,1$ kNm	59,1	69,4	65,3	64,4	70,1	88,1	91,6
Myötömomentti	$M_p = 35,3$ kNm	29,0	66,6	34,1	36,0	49,4	50,7	47,8



kpl no:	puu-laji	palkki malli	leveys [mm]	korkeus [mm]	kosteus [%]	kuiva		koe tiheys [kg/m ³]	Murtokuorma		Taivutusjäännitys		Leikkaus-jännitys [MPa]
						leveys [mm]	korkeus [mm]		Fm [kN]	Fp,est [kN]	murto [MPa]	plast,est [MPa]	
P 9	kuusi	suora	102	298	22,8	390	419	432	31,07	24,49	41,16	32,44	
P 11	kuusi	suora	98	299	21,8	386	415	428	29,53	23,05	40,44	31,57	
P 12	kuusi	suora	146	279	22,8	401	432	442	24,94	---	31,05	23,58	
P 13	kuusi	suora	146	303	22,3	392	421	441	34,68	26,34			4,39
P 14	kuusi	suora	152	300	22,3	392	421	441	133,36	---			
P 14	kuusi	suora	101	255	21,3	401	431	448	14,55	---			4,68
P 15	kuusi	kiila	100	252	21,3	401	431	448	78,66	---			
P 15	kuusi	kiila	99	290	21,4	404	434	444	32,67	25,43	47,09	36,66	
P 16	kuusi	kiila	102	279	21,4	411	442	447	32,22	24,75	48,70	37,41	
P 25	mänty	suora	125	278	21,5	468	503	523	35,03	26,85	43,51	33,36	
P 26	mänty	kiila	124	278	21,5	468	503	523	135,13	---			5,88
P 27	mänty	kiila	101	312	20	548	590	598	44,03	33,65	53,74	41,08	
P 27	mänty	kiila	101	310	20	548	590	598	45,80	35,01	56,63	43,29	
T30		taivutus											

2

23

kiilapalkkien mitat kuormituspisteestä, jonka korkeus matalin

P 12 ja P 14 kosteus ja tiheys otettu kattotuolien näytepaloista
P 25 ja P 26 koehetken kosteus on oletettu

Kaavat tutkimuslaskuksen no 10/90 mukaan

$$f_{red} = f_m \sqrt{\frac{f_{c,ka}}{f_{c,i}}}$$

$$f_c = 0,095 p_{ow} \left(2 - \frac{u}{15} \right)$$

 f_{red} = lujuuden tiheys- ja kosteuskorjattu arvo f_c = tiheys- ja kosteuskorjauskertoin p_{ow} = koekappaleen tiheys u = koekappaleen kosteus f_m = koekappaleen murtojäännitys

$$f_k = \bar{f}_{red} (1 - kv)$$

 f_k = lyhytaikainen ominaislujuus \bar{f}_{red} = korjattujen tulosten keskiarvo k = koekappaleiden lukumäärä stäipäva keroin v = koetulosten suhteellinen keskihajonta s/\bar{x}

Leikkaus	Taivutus				Kimmomoduli				Liukomoduli	
	f_m koetus [MPa]	f_c kerroin	$f_{red,m}$ korjattu arvo [MPa]	$f_{red,plast}$ plast.jänn korj.arvo [MPa]	f_m koetus [MPa]	E_f kaikki [MPa]	E_f murto [MPa]	E_f suorakaide [MPa]		E_G [MPa]
P 9	41,16	17,784	48,30	38,08	89	11759	11759	11759	10072	89
P 11	40,44	20,0463	44,71	34,90	90	12161	12161	12161	10030	90
P 12					59	10033	10033	10033	7603	59
P 13	31,05	19,1165	35,14	26,69	71	9012	9012	9012	7710	71
P 14					53	10823	10823	10823	8260	53
P 15	47,09	22,0045	49,68	38,67	87	11836	11836	11836	9534	87
P 16	48,70	22,3858	50,94	39,14	76	11467	11467	11467	8904	76
P 25	43,51	25,194	42,90	32,89	83	12424	12424	12424	10746	83
P 26	53,74	34,7067	45,14	34,51	107	12645	12645	12645	10129	107
P 27	56,63	34,7067	47,57	36,36	123	12372	12372	12372	11925	123
keskiarvo	45,2885	24,4931	45,5475	35,1546		11453,2	11709,5	11035,3	9491,3	139,666667
keskihajonta	8,11712		4,98373	4,06152		1170,08	1157,72	1575,25	1244,1	16,8586561
v	0,17923		0,10942	0,11553		0,10216	0,09887	0,14275	0,13108	0,12070637
ominaisarvo	26,9438		34,2843	25,9755		8996	9093	7223	6879	104

Mukana sekä tiheys- että kosteuskorjaus 15 %:n

Ei tiheys- tai kosteuskorjausta

Sahatavaran tiheydet "Sahatavaran lujuuslajitteluopas -93"

Tiheys kg/m³ 15 %:n kosteudessa

	T40	T30	T24	T18
mänty	500	450	400	350
kuusi	470	420	370	320

lkm	4	5	10	15	25	00
k	2,7	2,5	2,1	2,0	1,9	1,7

8 kpl => k = 2,26

3 kpl => k = 2,7

VAKOLAn tutkimusselostuksia

41. Lietelannan kompostointilämmön talteenotto. 1986.
42. Kasviöljyt dieselmoottorin polttoaineena. 1986.
43. Traktorin polttoaineenkulutukseen vaikuttavia seikoja. 1986.
44. Alipaineilmanvaihto kotieläinsuojissa. 1986.
45. Kompostoinnin vaikutus lietalannan laatuun ja käsittelyyn. 1986.
46. Käyttökokemuksia 80-luvulla rakennetuista kalustovajoista, varastokuivureista ja pihatoista. 1987.
47. Lannoitteenlevityksen tasaisuus. 1987.
48. Jauhatuksen tilantarve ja pölyhaittojen vähentäminen. 1987.
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. Syyskyntöä korvaavien muokkausmenetelmien vaikutus kevätvehnän satoon 1975-1988. Pitkäaikaisen aurattoman viljelyn vaikutukset hieusaven 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.

VAKOLAn rakennusratkaisuja

1/1994 Kylmä osakuivikepohjainen emolehmäkasvattamo.

VAKOLAn tiedotteita

- 41/87 Jauhatus työn järjestelyjä ja kustannuksia.
- 42/88 Lannanpoistolaitteiden toimivuus ja kestävyys.
- 43/88 Käytännön ohjeita konevaraston hankintaa suunnittelevalle.
- 44/89 Pohjoismaiset lypsykone- ja laiteohjeet
- 45/89 Säilörehun korjuu pyöröpaalaimella
- 45 S/89 Rundbalsensilering
- 46/90 Kevytsora lietesäiliön katteena
- 47/90 Lietelannan kompostointi
- 48/90 Turvallinen ja nopea työkoneiden kytkentä
- 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 Tyhjiä 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 jyräkylvölannoittimista
- 67S/94 Bruks erfarenheter av vältkombisåmaskiner
- 68/94 Käsikäyttöisten liekittimien käyttöominaisuuksia
- 69/95 Renkaiden vaikutus traktorin vetokykyyn ja maan tiivistymiseen
- 70/95 Hakkeen kuivaus imuilmalla
- 71/95 Klapikattiloiden käyttöominaisuudet

