

Vesa Penttala

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 15  
No. 3 1982 s. 34...50

**YHTEENVETO:** Kirjoituksessa tarkastellaan suorja ja tasajäykkiä liimapuupalkkeja, joissa on vahvistamaton ympyränmuotoinen reikä palkin korkeuden puolivälissä. Soveltamalla Kolosovin - Muskhelishvilin levytehtävän kompleksifunktioiden teoriaa on reiälliselle liimapuupalkille johdettu mitoitusmenetelmä jännitysten jakautumisen ja palkin halkeamakuorman määrittämiseksi. Artikkelissa esitetään anisotrooppiselle materiaalille perustuvan mitoitusmenetelmän ratkaisuyhtälö. Teorian käyttökelpoisuuden ja tarkkuuden määrittämiseksi suoritettiin viidellä ympyräreikäisellä liimapuupalkilla taivutuskokeet, joissa mitattiin palkkien muodonmuutokset, pintojen venymiä, halkeamien muodostumista sekä määritettiin halkeama- ja murtokuormat. Ympyräreikäisten palkkien anisotrooppisella teorialla saatiin tuloksia, jotka poikkesivat koetuloksista keskimäärin 15 %. Koepalkkien suurikokoiset reiät pienensivät reiättömien palkkien laskennollisen murtokuorman keskimäärin puoleen.

#### JOHDANTO

Tehdas- ja hallirakennusten suunnittelussa on ilmanvaihtoputkitusten ja muiden putkien reikävaraukset muodostuneet yhä merkittävämmäksi kannattimien mitoittamiseen vaikuttavaksi tekijäksi. Kerroskorkeuden pienentämiseksi suuretkin putket pyritään johtamaan palkkien lävitse, jolloin myös kannattimien tukien läheisyyteen halutaan sijoittaa reikiä. Laitteistojen uusimista ja muutostarpeiden varalta on palkkeihin tehty ylimääräisiäkin reikiä käyttämällä systeemirei'itystä.

Toisin kuin kilpailevista materiaaleista valmistetuilla palkeilla on reiällisen liimapuupalkin mitoittamisesta tehty erittäin vähän tutkimuksia. Tämän johdosta myös suunnitteluohjeet ovat hyvin pintapuolisia ja reiällisen liimapuupalkin toimintaa ei tunneta riittävän tarkasti. Teräsbetoni- ja teräspalkkien reikien mitoittamisesta on yksityiskohtaiset ohjeet ja tästä muodostuneet yhä tärkeämpi kilpailutekijä. Kilpailijoihinsa nähden liimapuupalkeilla on eräs merkittävä etu. Reiät voidaan tehdä tarvittaessa helposti myös jälkeinpäin, jos mitoitusmenetelmä ja jännitysten jakautuminen reikien kohdalla tunnetaan riittävän tarkasti.

Reiällinen liimapuupalkki voidaan vahvistaa esimerkiksi kansiruuveilla, pulteilla tai naulaliimaamalla vanerilevyt reiän ympärille. Näiden vahvistamisen menetelmien mitoituskaavojen kehittäminen on vielä alkutekijöissään ja

käytettävissä olevat mitoitusmenetelmät perustuvat pelkästään koetuloksiin ilman merkittävää teoreettista tarkastelua.

G.V. Kolosov ja N.I. Muskhelishvili [6] kehittivät menetelmän reiällisen ja isotrooppisen levyn jännitystilän ratkaisemiseksi. Kyseinen kompleksifunktioiden teoria yleistettiin pian soveltuvaksi myös anisotrooppisille materiaaleille erityisesti G.N. Savinin [9] ja S.G. Lekhnitskiin [5] toimesta. Reiällisen palkin mitoittamisessa tarvittavaksi murtoehdoksi on valittu Hankinsonin kaava, sillä reiällisen palkin murtuminen alkaa reiän reunalta puun vetolujuuden ylittyessä.

## TEOREETTINEN TARKASTELU

Kolosovin - Muskhelishvilin teoria soveltuu sekä tasomuodonmuutostilan että tasojännitystilän kuvaamiseen. Levytehtävän ratkaisussa käytetään kompleksifunktioiden teoriaa, jossa muuttujina ovat kompleksiluku  $z = x + iy$  ja sen konjugaattiluku  $\bar{z}$ . Tällöin Airyn jännitysfunktio isotrooppiselle materiaalille voidaan esittää muodossa

$$\Delta\Delta U(x,y) = 16 \frac{\partial^4 U(z, \bar{z})}{\partial z^2 \partial \bar{z}^2} = 0, \quad (1)$$

jossa biharmoninen jännitysfunktio  $U(x,y)$  voidaan esittää kahden tuntemattoman kompleksisen funktion avulla. Myös jännitykset  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  ja  $\tau_{xy}$  voidaan esittää kyseisten kompleksifunktioiden avulla [7].

Jos anisotrooppisella materiaalilla kuten puulla oletetaan olevan kolme symmetriatasoa, saa jännitysfunktion osittaisdifferentiaaliyhtälö muodon

$$a_{22} \frac{\partial^4 U}{\partial x^4} + (2a_{12} + a_{66}) \frac{\partial^4 U}{\partial x^2 \partial y^2} + a_{11} \frac{\partial^4 U}{\partial y^4} = 0, \quad (2)$$

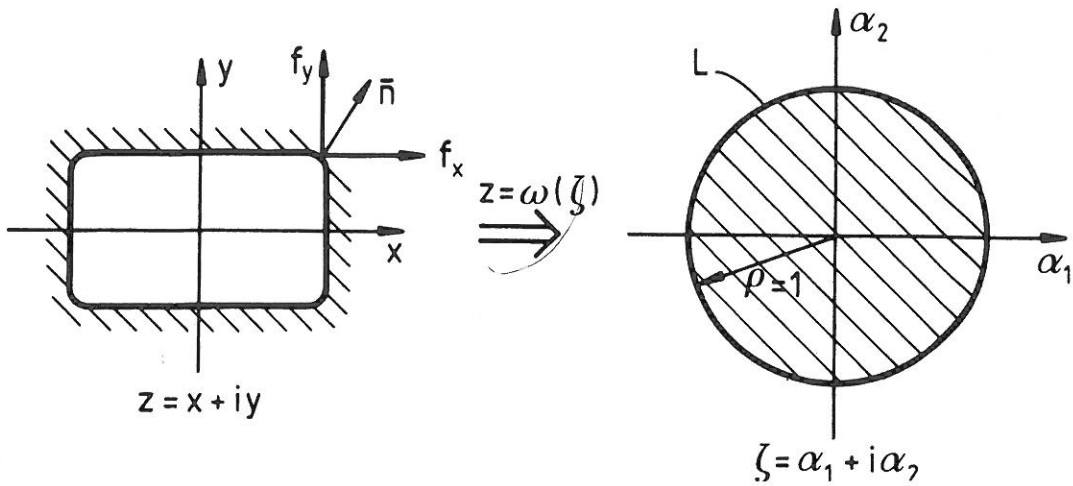
jossa  $a$ :t ovat yleistetyn Hooken lain mukaiset materiaalivakiot.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \chi_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Myös anisotrooppisen materiaalin jännitysfunktio voidaan esittää kompleksimuodossa kahden analyttisen funktion avulla, joista voidaan myös määrittää jännityskomponentit Lekhnitskiin [5] esittämien kaavojen avulla.

Tuntemattomien funktioiden ratkaisemiseksi levytehtävän reunaehdoista kuvataan reiällinen levy yksikköympyrään, jonka reuna-arvoprobleeman ratkaisu on tunnettu.

Ratkaisufunktiot määritetään funktionaaliyhtälöryhmästä yksikköympyräkoordinaatistossa, jonka jälkeen ne palautetaan alkuperäiseen  $xy$ -koordinaatistoon käänteismuunnoksen avulla. Anisotrooppisessa teoriassa käytetään

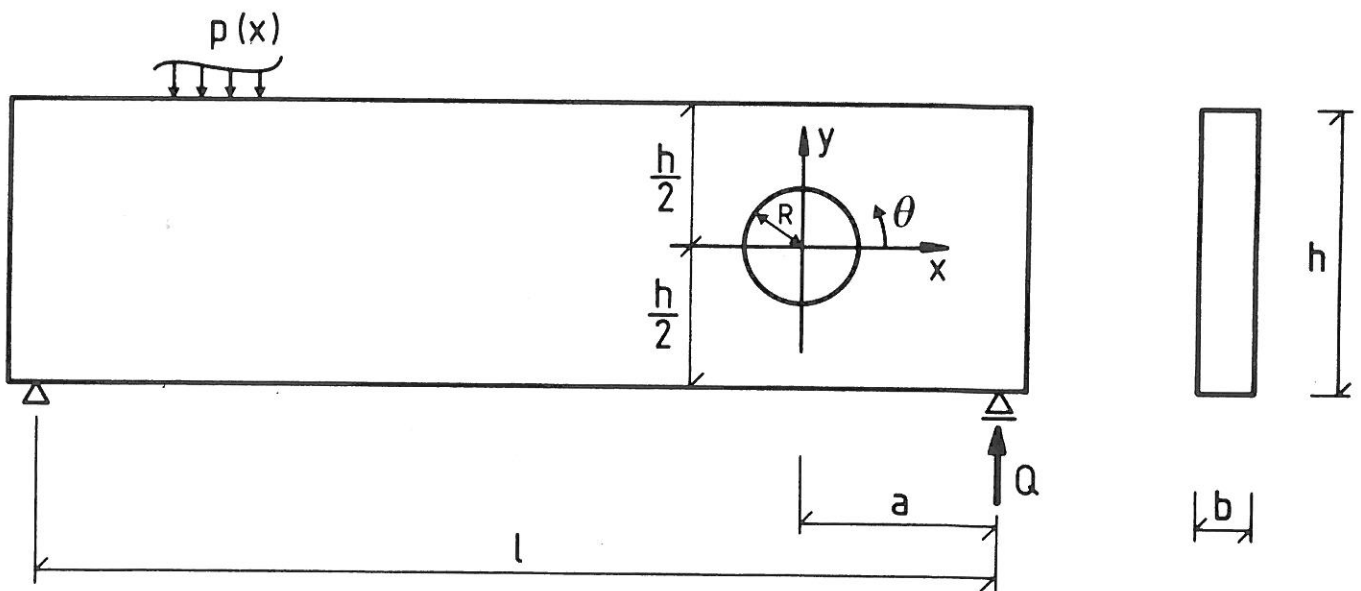


Kuva 1. Reiällisen levyn kuvaus yksikköympyrään.

kahta kompleksista muuttujaa  $z_1$  ja  $z_2$ , joten kuvausfunktioitakin on kaksi. Tehtävän ratkaisemisessa on tarkoituksenmukaista jakaa jännitykset, jännitysfunktio ja haettavat analyttiset funktiot kahteen osaan. Tarkastellaan reiättömän levyn aiheuttamaa jännitystilaa erillisenä reiän aiheuttamasta jännitystilasta ja superponoidaan lopputulokset.

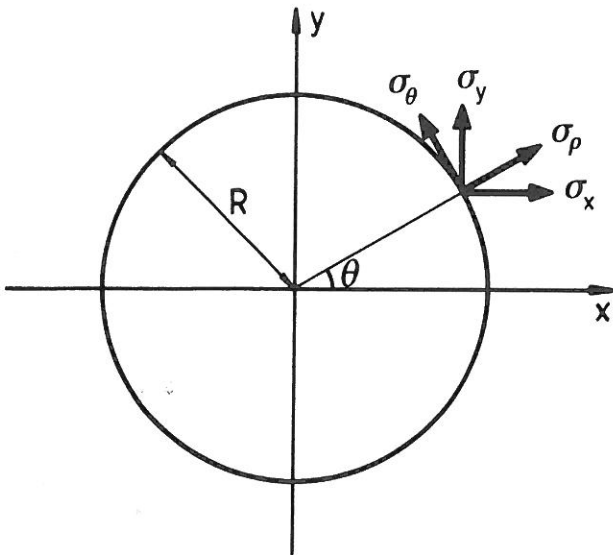
Ratkaisumenetelmän yksityiskohtainen johto ja tarkastelu on esitetty julkaisussa [7] ja seuraavassa esitetään muunnoskaavoiltaan yksinkertaisimman tapauksen, ympyräreikäisen palkin, reiän reunajännitysten ratkaisukaavat.

Tarkastellaan kuvan 2 mukaista liimapuupalkkia ja tarkastelun yksinkertaistamiseksi oletetaan, ettei reiän lähiympäristössä eikä reiän ja oikeanpuoleisen tuen välissä vaikuta ulkoisia kuormia.



Kuva 2. Liimapuupalkin dimensiot, reiän sijainti ja koko sekä koordinaatisto.

Ympyräreiän reunajännitykset esitetään kuvan 3 mukaisin merkinnöin.



Kuva 3. Ympyräreiän reunajännitykset.

$$\begin{cases} \sigma_x = -\frac{Q}{I} (a - R \cos \theta) R \sin \theta + 2\beta_1^2 A + 2\beta_2^2 B \\ \sigma_y = -2(A+B), \end{cases} \quad (4)$$

jossa

$$\begin{cases} A = +A_1 C(\beta_1) + A_2 D(\beta_1) + A_3 E(\beta_1) \\ B = +B_1 C(\beta_2) - A_2 D(\beta_2) + B_3 E(\beta_2) . \end{cases} \quad (5)$$

Funktiot  $A_1, A_2, A_3, B_1, B_3, C(\beta), D(\beta)$  ja  $E(\beta)$  ovat

$$\begin{cases} A_1 = \frac{QR}{16I} \frac{R^2(\beta_2+2) - h^2(\beta_2+1)}{\beta_1 - \beta_2} \\ A_2 = \frac{QR^2 a}{8I(\beta_1 - \beta_2)} \\ A_3 = -\frac{QR^3(\beta_2+6)}{48I(\beta_1 - \beta_2)} \\ B_1 = -\frac{QR}{16I} \frac{R^2(\beta_1+2) - h^2(\beta_1+1)}{\beta_1 - \beta_2} \\ B_3 = \frac{QR^3(\beta_1+6)}{48I(\beta_1 - \beta_2)} \\ C(\beta) = \frac{(1+\beta) \sin \theta \cos \theta}{R(\sin^2 \theta + \beta^2 \cos^2 \theta)} \\ D(\beta) = \frac{2((1+2\beta) \sin \theta \cos^2 \theta - \sin^3 \theta)}{R(\sin^2 \theta + \beta^2 \cos^2 \theta)} \\ E(\beta) = \frac{3\{(3\beta+1) \sin \theta \cos^3 \theta - (\beta+3) \sin^3 \theta \cos \theta\}}{R(\sin^2 \theta + \beta^2 \cos^2 \theta)} , \end{cases} \quad (6)$$

jossa  $\beta_1$  ja  $\beta_2$  saadaan kaavan (3) kimmovakioiden avulla yhtälöstä

$$\beta_{1,2} = \sqrt{\frac{(2a_{12}+a_{66}) \pm \sqrt{(2a_{12}+a_{66})^2 - 4a_{11}a_{22}}}{2a_{11}}} \quad (7)$$

Koska reiän ympäristön jännitysjakautumaan vaikuttavat enemmän anisotrooppisten kimmovakioiden keskinäiset suhteet kuin niiden absoluuttiset arvot, on tasomuodonmuutostilassa olevan liimapuupalkin kimmovakiot otettu R. Keylwerthin [2] koetuloksista. Kimmovakioiden  $a$  voidaan katsoa soveltuvan liimapuulle lujuusluokasta riippumatta.

Taulukko 1. Kaavan (3) mukaisia puun materiaalivakioita Keylwerthin [2] tuloksista.

	kuusi (m <sup>2</sup> /GN)	mänty (m <sup>2</sup> /GN)
$a_{11}$	0,0624	0,0610
$a_{12}$	-0,0356	-0,0371
$a_{22}$	1,314	0,734
$a_{66}$	1,32	1,49

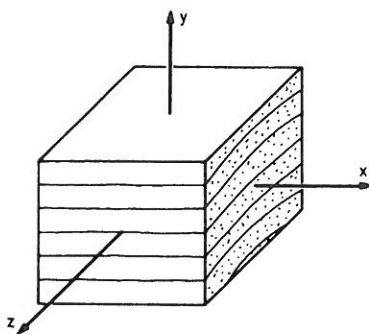
Jännitysten laskemisessa ei tarvita kimmovakioita  $a_{16}$  ja  $a_{26}$ .

Käyttämällä Keylwerthin materiaalivakioita saadaan taulukon 2 mukaiset anisotropiatermien  $\beta$  arvot.

Taulukko 2. Yhtälön (7) anisotropiatermit  $\beta_1$  ja  $\beta_2$  Keylwerthin materiaalivakioista laskettuna.

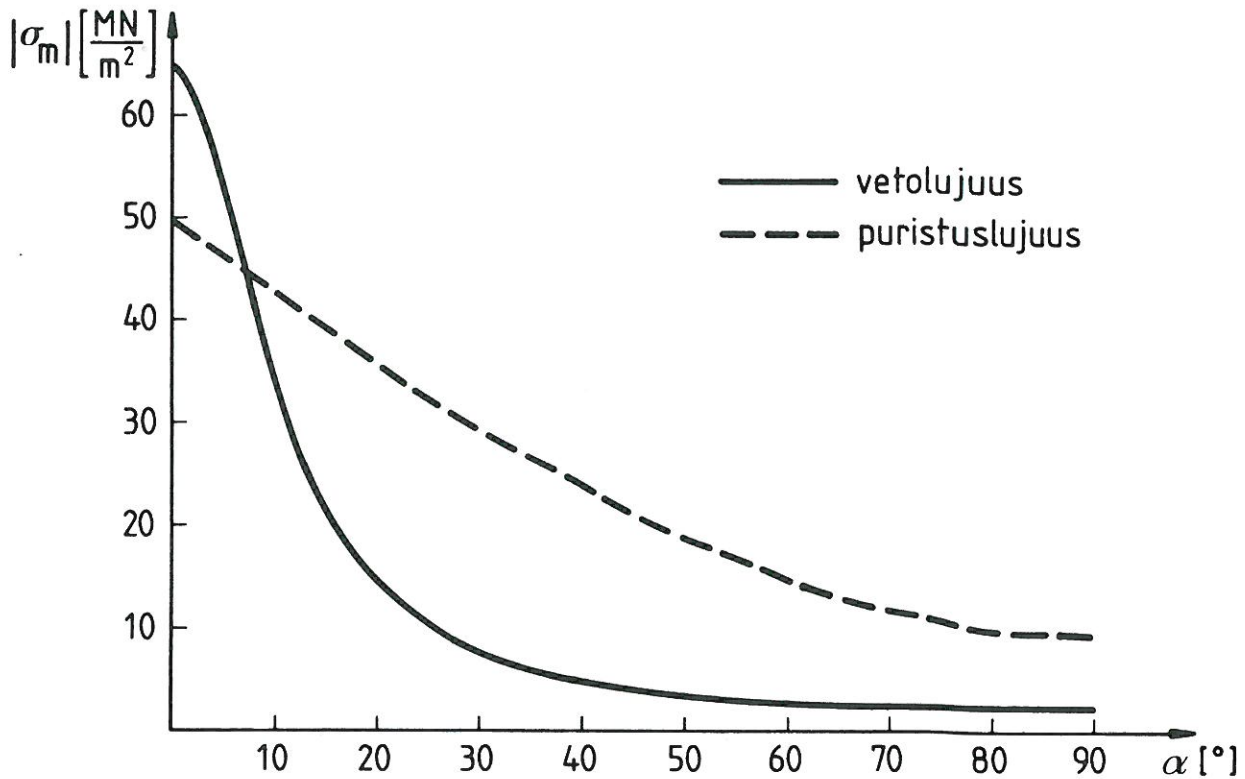
	kuusi	mänty
$\beta_1$	4,347	4,762
$\beta_2$	1,056	0,728

Puulle sovellettavan kuutiosymmetrisen materiaalimallin symmetriatasojen suunnat on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Puun symmetriatasot koordinaatistossa. Puun syiden suunta yhtyy x-akselin suuntaan.

Reiällisen liimapuupalkin murtuminen alkaa reiän reunalta, jossa jännitys ylittää puun murtolujuuden. Tämän johdosta on tiedettävä puun murtoehto voiman ja puun syyn välisen kulman funktiona. Puurakenteiden standardeista voidaan todeta, että puun karakteristiset puristuslujuudet ovat selvästi suurempia kuin vetolujuudet sekä syiden suuntaan että kohtisuoraan niitä vastaan. Kuvassa 5 on esitetty keskimääräisiä veto- ja puristuskoetuloksia syyn suunnan ja voiman vaikutussuunnan välisen kulman funktiona. Se, että standardit sallivat suuremman syyn suuntaisen karakteristisen puristuslujuuden kuin vetolujuuden, johtuu oksien ja muiden vikojen vetolujuutta pienentävästä vaikutuksesta.



Kuva 5. Keskimääräinen puun veto- ja puristuslujuus syiden suunnan ja voiman välisen kulman funktiona.

Kuvan 5 esittämien käyrien kuvaamiseksi on johdettu lukuisia kaavoja, mutta yleisimmät ovat vetolujuudelle ns. Hankinsonin kaava

$$f_{t\alpha} = \frac{f_t f_{t\perp}}{f_t \sin^2 \alpha + f_{t\perp} \cos^2 \alpha} \quad (8)$$

ja puristuslujuudelle puurakenteiden suunnitteluohjeissakin esitetty kaava

$$f_{c\alpha} = f_c - (f_c - f_{c\perp}) \sin \alpha, \quad (9)$$

jossa  $\alpha$  on syiden suunnan ja voiman välinen kulma,

$f_t$  ja  $f_{t\perp}$  ovat puun vetolujuudet syiden suunnassa ja kohtisuoraan syitä vastaan ja

$f_c$  ja  $f_{c\perp}$  ovat puun puristuslujuudet syiden suunnassa ja kohtisuoraan syitä vastaan.

Koska puun puristumurto on luonteeltaan plastisempi kuin vetomurto ja siihen eivät puun oksat ja muut viat suuresti vaikuta, ei reiällinen liimapuupalkki menetä kantokykyään puristumurtona vaan palkit murtuvat aina puun vetolujuuden ylittymisestä. Tämän johdosta reiällisen liimapuupalkin murtoehdoksi riittää yhtälö (8).

Kuvan 3 mukaisista reunajännityksistä tarvitaan mitoitusehto varten ainoastaan reiän reunan tangentin suuntainen komponentti  $\sigma_\theta$ , joka saadaan kaavojen (4) jännityksistä joko yhtälön

$$\sigma_\theta(\theta) = \frac{2\sigma_x}{1 - \cos^2\theta} \quad (10)$$

tai yhtälön

$$\sigma_\theta(\theta) = \frac{2\sigma_y}{1 + \cos^2\theta} \quad (11)$$

avulla. Kaava (10) ei ole voimassa, jos  $\theta$ :n arvo on lähellä nollaa tai arvoa  $\pi$ . Kaavaa (11) ei voida käyttää, kun  $\theta$  on lähellä  $\pi/2$ :ta tai arvoa  $3\pi/2$ .

Reiän reunalla on  $\sigma_\theta$  pääjännitys ja  $\sigma_\rho = \tau_{\theta\rho} = 0$ , joten mitoitus ehdoksi eli murtoehdoksi saadaan yhtälöstä (2)

$$\sigma_\theta(\theta) \leq f_{t\alpha} = \frac{f_t f_{t\perp}}{f_t \cos^2\theta + f_{t\perp} \sin^2\theta},$$

jossa  $\sigma_\theta(\theta)$  lasketaan joko yhtälöstä (10) tai (11). Esimerkiksi yhtälöstä (10) saadaan sallituksi leikkausvoimaksi

$$Q_{\text{sall}} = \frac{1 - \cos 2\theta}{2} \cdot \frac{f_t f_{t\perp}}{f_t \cos^2\theta + f_{t\perp} \sin^2\theta} \quad (13)$$

$$(R \cos\theta - a) R \sin\theta + 2\beta_1^2 \frac{A}{Q} + 2\beta_2^2 \frac{B}{Q}$$

jossa  $\frac{A}{Q}$  ja  $\frac{B}{Q}$  saadaan kaavoista (5) ja  $a = \frac{M}{Q}$ .

Ympyräreiällisen liimapuupalkin mitoittaminen yhtälön (12) avulla voi tapahtua kahdella tavalla.

1. Voidaan laskea reiän reunan jännitykset  $\theta$ :n arvoilla  $0 \dots 360^\circ$ :een jollakin valitulla kuormituksen arvolla ja verrata saatua käyrää mitoitusyhtälöön (12). Jännityskäyrää kasvattamalla tai pienentämällä voidaan laskeollisesti määrittää se kuormituksen arvo, jolla käyrillä on vain yksi yhteinen piste. Saatu halkeamakuorma voidaan sen jälkeen jakaa materiaalin osavarmuuskertoimella laskentakuorman määrittämiseksi. Käyrien yhteinen piste määrittelee reiän sen kohdan, johon ensimmäinen halkeama syntyy.

2. Koska ensimmäisen halkeaman esiintymiskohta vaihtelee varsin vähän

Palkeissa käytetyn liimapuun materiaaliominaisuuksien määrittämiseksi valmistettiin jokaisesta koepalkista neljänlaisia koekappaleita. Jokaisesta palkista tehtiin kolme standardin ASTM D 198-76 mukaista vetokoekappaleita ja kolme standardin ASTM D 198-76 mukaista puristuskoekappaleita 100 x 50 x 50. Tämän lisäksi valmistettiin jokaisesta koepalkista kahdeksan standardin ASTM D 143-52 mukaista koekappaleita puun syitä vastaan kohtisuoraan vetolujuuden määrittämiseksi. Jokaisen liimapuupalkin kosteustila määritettiin kolmesta puukuutiosta 50 x 50 x 50. Kaikki materiaalikoekappaleet irrotettiin koepalkkien reiän vierestä. Liimapuupalkit kuormitettiin vapaastituetuina, yksiaukkoisina palkkeina jännevälän puolivälissä sijainneen pistemäisen voiman avulla. Palkkien kiepahtamisen estämiseksi olivat korkeammat palkit 4 ja 5 tuettuja palkin keskiosasta palkin kiertymisen estävillä sivutuilla.

Palkkien taipumat, kiertymät sekä venymät reikien ympäristössä mitattiin induktiivisten antureiden avulla. Koepalkit kuormitettiin puurakenteiden kokeellisen mitoituksen kuormitusaikataulun mukaisesti.

#### KOKEIDEN TULOKSIA

Koepalkkien taipumat ja venymät kasvoivat lähes lineaarisesti kuormituksen suhteessa halkeamakuorman saavuttamiseen asti. Koepalkkien halkeamakuormat ja murtokuormat on esitetty taulukossa 4. Halkeamakuormaksi kutsutaan sitä kuorman arvoa, jolla ensimmäinen havaittu halkeama syntyi. Jos taulukossa ei ole esitetty halkeamakuormaa, palkki murtui ensimmäisen halkeaman ilmestyessä.

Taulukko 4. Koepalkkien halkeamakuormat ( $P_h$ ) ja murtokuormat ( $P_m$ ).

Palkki	$P_h$ [kN]	$P_m$ [kN]
1		67,6
2		63,1
3		102,6
4 *)	114,1	131,8
5		178,9

\*) Palkki murtui liimasauman kohdalta.

Kaikki ympyräreikäiset palkit murtuivat äkillisesti ensimmäisen halkeaman syntyessä paitsi palkki 4, johon syntyi halkeama hieman ennen palkin murtumista huonosti onnistuneen liimasauman kohdalle.

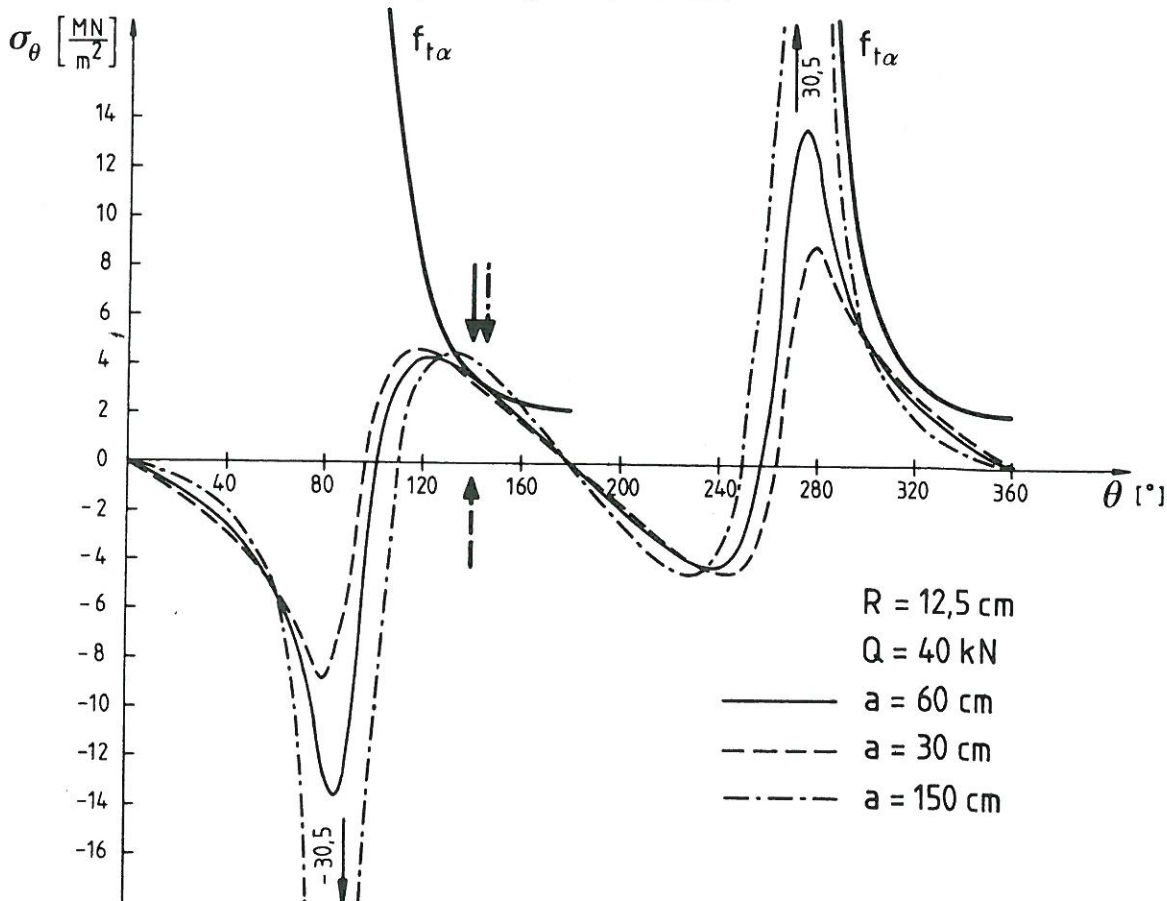
Halkeamien sijainti reiän reunassa on esitetty kuvassa 8 ja taulukossa 5.

reiän sijainnin ja koon vaihdellessa, voidaan halkeamakohtaa vastaava  $\theta$ :n arvo määrittää etukäteen. Keskimääräiseksi arvoksi voidaan valita  $\theta = 140^\circ$ . Tässä toisessa mitoittamistavassa tarvitsee reiän reunajännitys  $\sigma_\theta$  laskea vain arvolla  $\theta = 140^\circ$  ja verrata tulosta mitoitusehtoylehtälön (12) vastaavaan arvoon  $f_{t140}$ , jolloin halkeamakuorma voidaan määrittää.

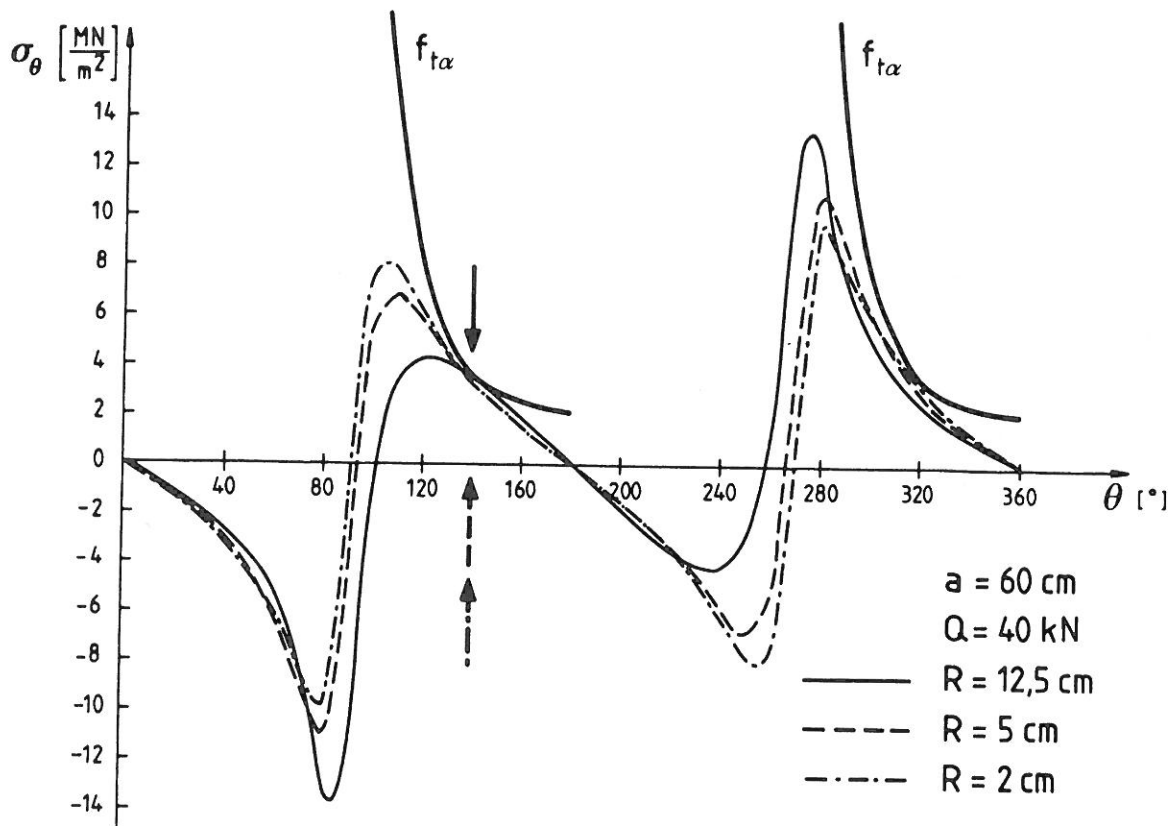
Mitoitusmenetelmien havainnollistamiseksi ja halkeamakuormaa vastaavan  $\theta$ :n arvojen määrittämiseksi on seuraavissa kuvissa esitetty  $\sigma_\theta$ :n kuvaajia reiän sijainnin tai koon vaihdellessa.

Mitoituskaavan (12) käyttöä haittaa puurakenteiden suunnitteluohjeiden antamien ominaislujuuksien erittäin konservatiiviset arvot erityisesti syitä vastaan kohtisuoran vetolujuuden  $f_{t\perp k}$  osalta. Esimerkiksi julkaisun [7] kymmenestä koepalkista L40D irroitetuista koekappaleista saadaan ominaislujuuksiksi  $f_{t\perp k} = 1,0$  ja  $f_{tk} = 24,6 \text{ MN/m}^2$ , kun alitusosuutena käytetään 5 %:a. Suunnitteluohjeiden ominaislujuudet ovat vastaavasti  $f_{t\perp k} = 0,4$  ja  $f_{tk} = 18 \text{ MN/m}^2$ . Koska varsinkin  $f_{t\perp}$  vaikuttaa oleellisesti reikäpalkin mitoituskuormaan, pienentävät suunnitteluohjeiden konservatiiviset ominaislujuudet reikäpalkkien mitoituskuormat varsin vaatimattomiksi.

Jännitysten määrittämiskaavat (4)...(6) voidaan helposti ohjelmoida tavallisille pöytälaskimille, jolloin reikäpalkin sallittu kuorma saadaan mitoitetuksi varsin helposti ja nopeasti.



Kuva 6. Anisotrooppisen teorian mukaan lasketun ympyräreikäisen palkin reiän reunan jännitykset reiän sijainnin vaihdellessa. Ensimmäisen halkeaman sijainti on merkitty nuolella.



Kuva 7. Anisotrooppisen teorian mukaan lasketun ympyräreikäisen palkin reiän reunan jännitykset reiän koon vaihdellessa. Ensimmäisen halkeman sijainti on merkitty nuolella.

#### SUORITETUT KOKEET

Teorian käyttökelpoisuuden ja soveltuvuusalueen selvittämiseksi suoritettiin viidellä ympyräreikäisellä liimapuupalkilla taivutuskokeita. Kolmen koepalkin poikkileikkausdimensiot olivat  $500 \times 90 \text{ mm}^2$  ja jänneväli  $4000 \text{ mm}$  ja kaksi koepalkkia olivat poikkileikkausdimensioiltaan  $800 \times 115$  ja jänneväleiltään  $5000 \text{ mm}$ . Ympyräreiät sijaitsivat palkin korkeuden puolivälissä taulukon esittämällä etäisyydellä  $a$  tuelta kuvan 2 mukaisesti.

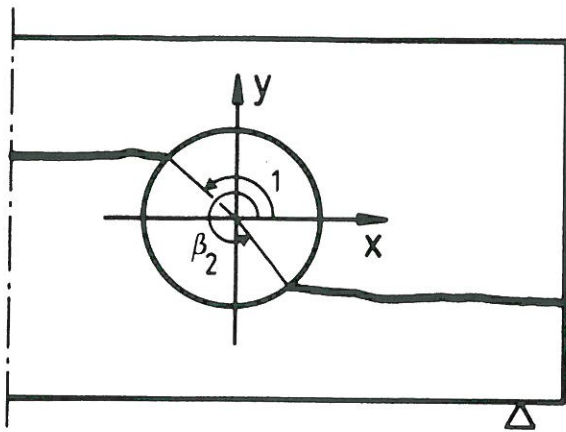
Taulukko 3. Koepalkkien reikien etäisyys tuelta ja reiän säde.

Koepalkki	Poikkileikkausdimensiot [mm]	Jänneväli [mm]	Etäisyys tuelta $a$ [mm]	Reiän säde [mm]
1	$500 \times 90$	4000	600	128
2	$500 \times 90$	4000	1048	126
3	$500 \times 90$	4000	600	77
4	$800 \times 115$	5000	820	201
5	$800 \times 115$	5000	1598	151

Liimapuupalkit valmistettiin  $33 \text{ mm}$  paksuista lujuusluokan L40D kuusipuulamelleista käyttäen U-luokan liimausta.

Taulukko 5. Halkeamien sijainti reiän reunassa.

Palkki	$\beta_1$ [°]	$\beta_2$ [°]
1	140	293
	142	298
2	147	320
	114	318
3	116	295
	125	281
4	130	303
	124	307
5	95,126	288
	107	280



Kuva 8. Taulukon 5 halkeamien sijainnin määrittelevät suureet.

Materiaalikoekkeista saadut puun syiden suuntaisten puristuslujuustulosten keskiarvo oli  $f_c = 49,7 \text{ MN/m}^2$  ja keskihajonta  $5,2 \text{ MN/m}^2$ , puun syiden suuntaisten vetolujuustulosten keskiarvo oli  $f_t = 64,8 \text{ MN/m}^2$  ja keskihajonta  $19,9 \text{ MN/m}^2$ . Puun syitä vastaan kohtisuorien vetolujuustulosten keskiarvo oli  $f_{t\perp} = 2,11 \text{ MN/m}^2$  ja keskihajonta  $0,53 \text{ MN/m}^2$ , koepalkkien tiheystulosten keskiarvoksi saatiin  $457,8 \text{ kg/m}^3$ , jolloin keskihajonta oli  $36,2 \text{ kg/m}^3$  ja puun kosteustulosten keskiarvo oli  $u = 0,082$  ja keskihajonta  $0,003$ .

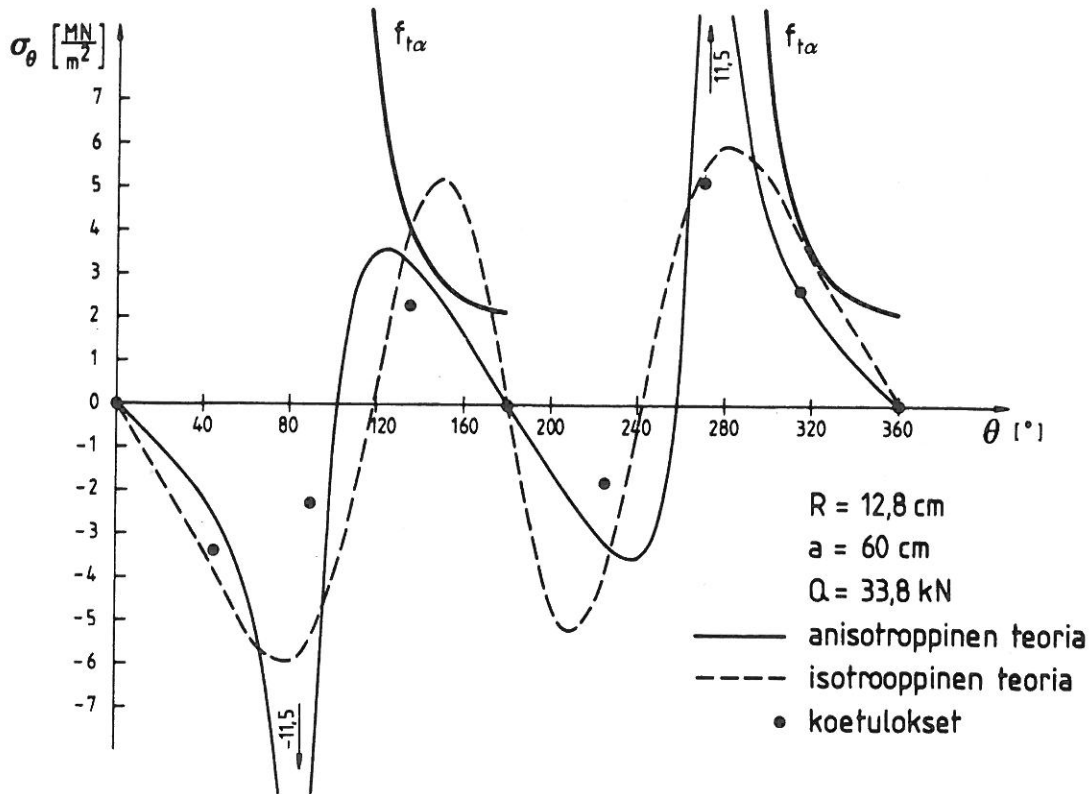
#### KOETULOSTEN TARKASTELU

Esitettyjen teorioiden jännitystulosten vertaamiseksi koepalkkien reikien reunajännitysarvoihin laskettiin reikien reunajännitykset sekä isotrooppisella että anisotrooppisella teoriolla käyttäen palkkikoekkeista saatuja halkeamakuorman  $P_h$  arvoja kuormituksenä. Koepalkkien reikien reunajännitykset saatiin venymätuloksista kertomalla ne kimmovakioilla.

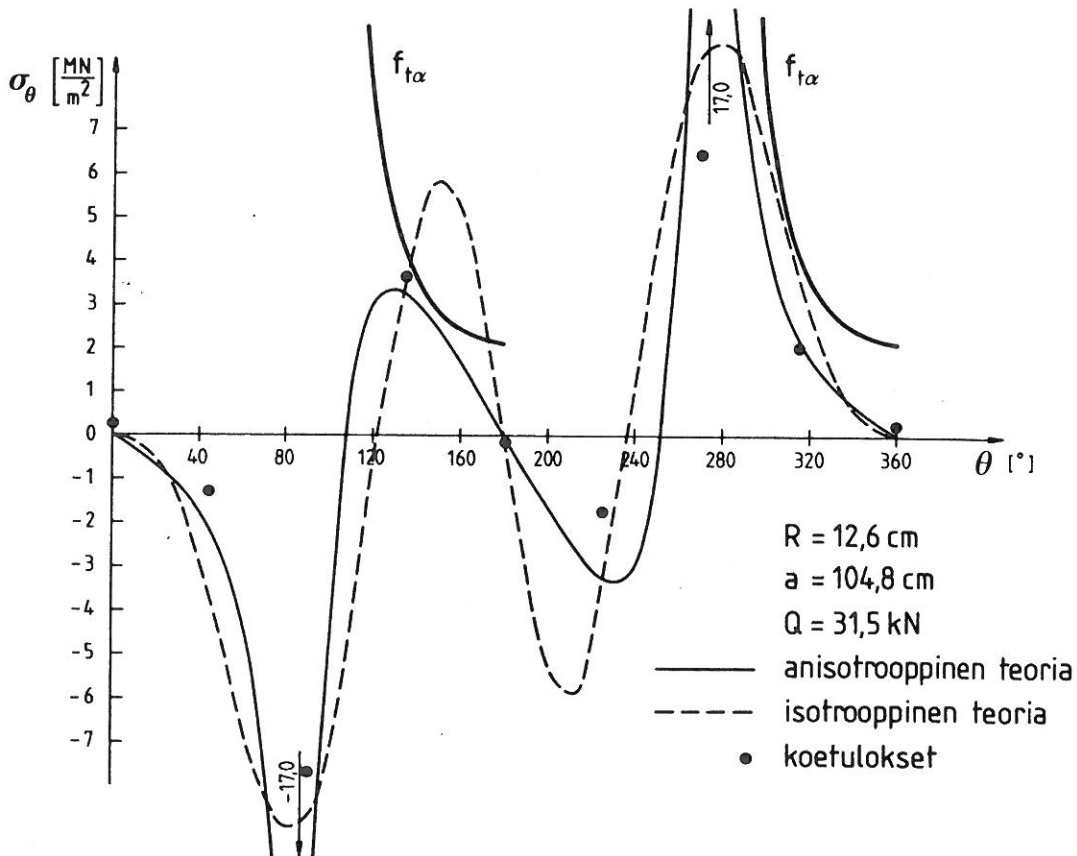
Koetulosten saamiseksi vertailukelpoisiksi halkeamakuormaa vastaavien jännityskäyrien kanssa ne on määritetty halkeamakuormaa edeltävän kuormitusportaan arvoista kertomalla ne kuormitusten suhteella. Teorioiden avulla saadut jännityskäyrät ja koetulokset on esitetty kuvissa 9...13.

Jännityskäyristä voidaan todeta, että jokaisessa koepalkissa isotrooppisella teoriolla lasketut jännitykset ylittävät huomattavasti murtoehtokäyrän  $f_{t\alpha}$ :n arvot. Ympyräreikien anisotrooppisen teorian jännityskäyrä jää kolmessa tapauksessa hieman murtokäyrän alapuolelle ja kahdessa tapauksessa ylittää sen pienellä alueella.

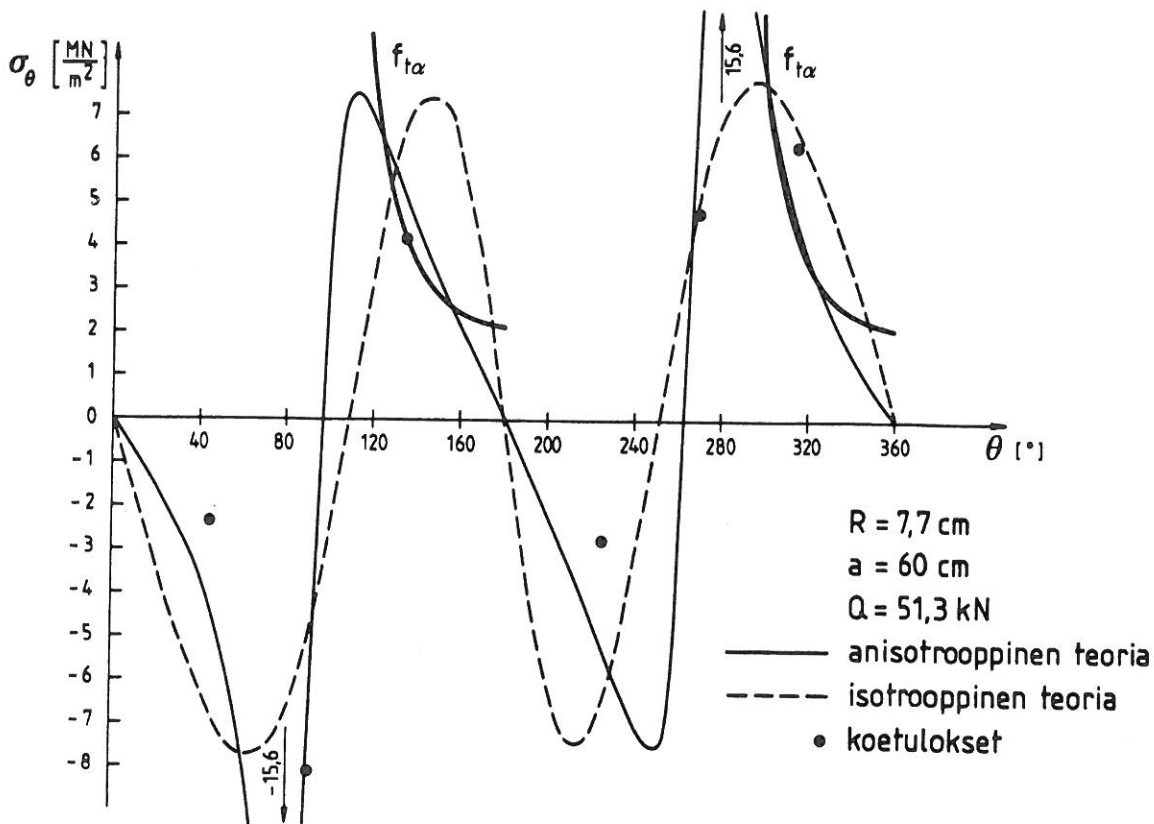
Koepalkkien reikien reunojen jännitystuloksia verrattaessa teoriatuloksiin on otettava huomioon, että niitä määritettäessä on käytetty keskimääräisiä kimmovakioita, joten ne voivat eri palkeissa vaihdella varsin paljon. Niinikään koepalkkien paikalliset viat kuten oksat ja puulamellien vinosyisyys ovat voineet vaikuttaa näihin koetuloksiin. Koepalkkien pintojen veny-



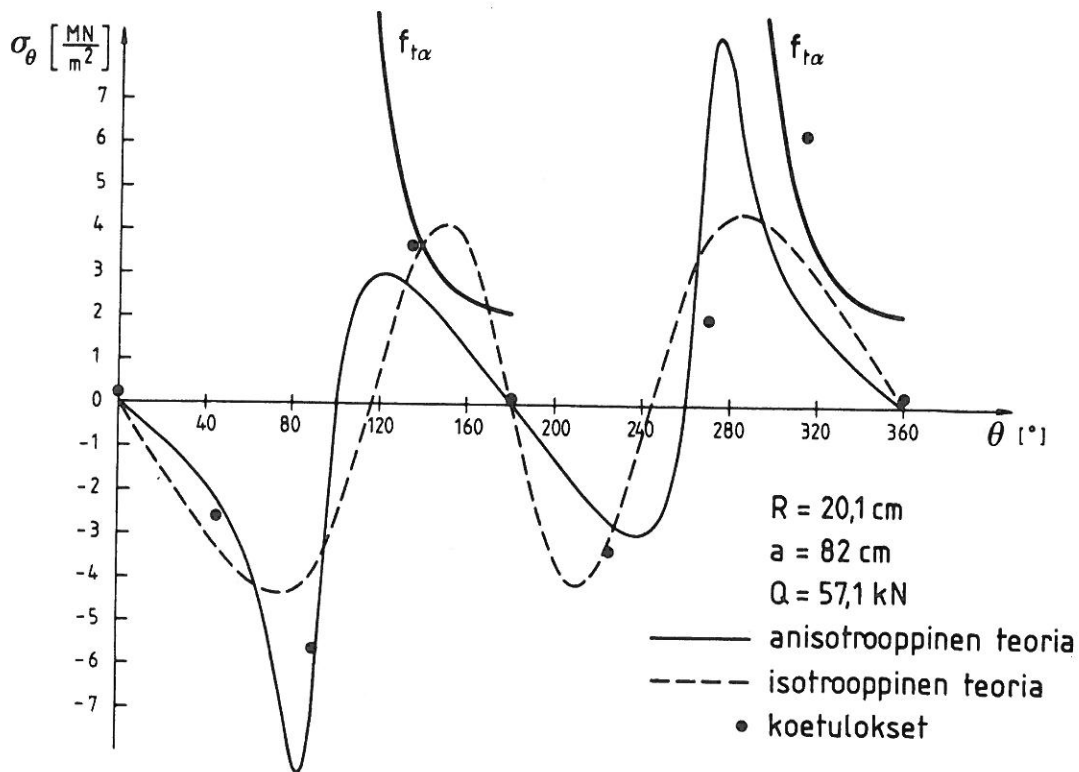
Kuva 9. Koepalkki 1:n jännitykset reiän reunalla kokeesta saatua halkeama-kuormaa vastaavalla kuormituksella.



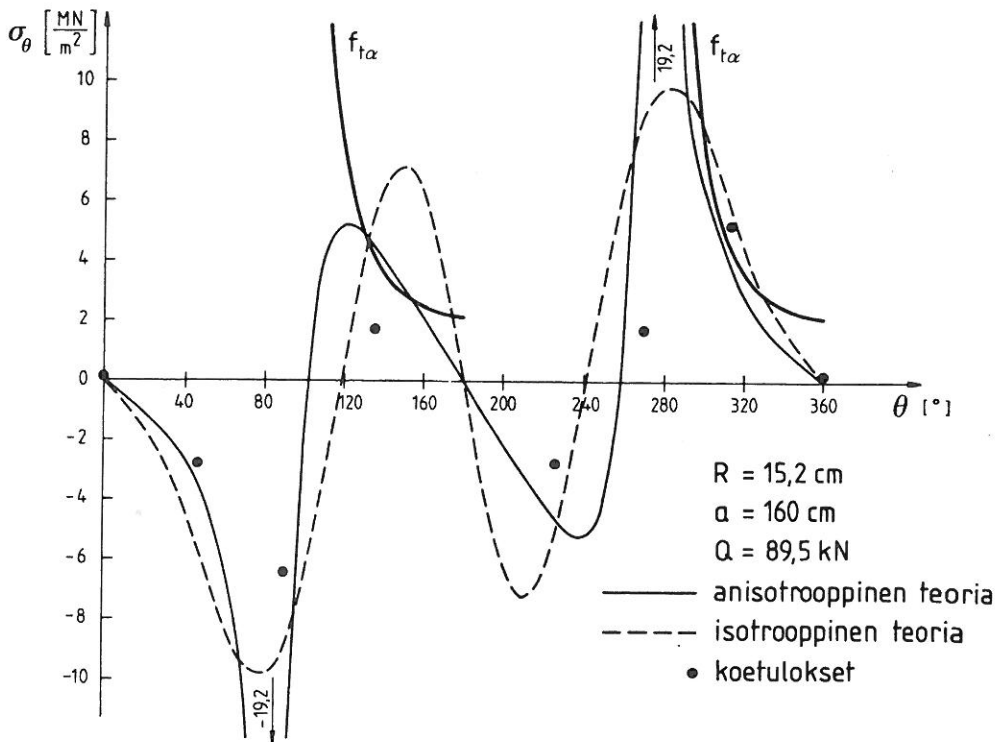
Kuva 10. Koepalkki 2:n jännitykset reiän reunalla kokeesta saatua halkeama-kuormaa vastaavalla kuormituksella.



Kuva 11. Koepalkki 3:n jännitykset reiän reunalla kokeesta saatua halkeama-kuormaa vastaavalla kuormituksella.



Kuva 12. Koepalkki 4:n jännitykset reiän reunalla kokeesta saatua halkeama-kuormaa vastaavalla kuormituksella.



Kuva 13. Koepalkki 5:n jännitykset reiän reunalla kokeesta saatua halkeamakuormaa vastaavalla kuormituksella.

mät on mitattu 10 mm reiän reunasta, kun teorioiden jännitykset kuvaavat reikien reunajännityksiä. Koska reiän aiheuttamat jännitykset ovat suurimmillaan reiän reunalla ja pienenevät varsin nopeasti reiän reunan normaalin suunnassa, on odotettavissa, että koetulokset antavat teoriatuloksia pienempiä arvoja.

Kuvissa 9...13 esitetyt koetulokset seuraavat varsin hyvin teoriatuloksia. Jännityskoetulosten hajontaa aiheuttavien tekijöiden moninaisuudesta johtuen ei näitä tuloksia voida kuitenkaan käyttää isotrooppisen ja anisotrooppisen teorian paremmuuden vertailussa. Koetulokset osoittavat, että kumpikin teoria antaa suuruusluokaltaan oikeita reunajännitystuloksia mitatuissa pisteissä.

Koepalkkien halkeamakuormia vertaamalla teorioiden antamiin halkemakuormiin voidaan arvioida teorioiden soveltuvuus vahvistamattomien reikäpalkkien mitoitusmenetelmäksi. Vertailun tulokset on esitetty taulukoissa 6 ja 7. Taulukoissa on verrattu edellä esitettyjä kahta mitoitusmenetelmää. Kun palkin halkeamakuorma on määritetty jännityskäyrän avulla, tuloksia on merkitty  $\min P_h$ :lla. Kun halkeamakuorma on määritetty valitulla  $\theta$ :n arvolla, on tuloksia merkitty kuorman arvolla  $P_h$  ( $\theta = 150^\circ$ ) tai  $P_h$  ( $\theta = 140^\circ$ ).

Taulukon 6 tuloksista huomataan, että ympyräreiällisten palkkien isotrooppinen teoria antaa halkeamakuormiksi vain noin puolet koepalkkien halkeamakuormien arvoista, joten teorian ei voida katsoa kuvaavan reiällisten liimapuupalkkien käyttäytymistä riittävän hyvin soveltuakseen mitoitusmenetelmäksi.

Ympyräreikäisten liimapuupalkkien anisotrooppinen teoria kuvaa taulukon 7 tulosten mukaan varsin hyvin koetuloksia. Palkin 4 halkeamakuorman ja teoria-

Taulukko 6. Ympyräreikäisten koepalkkien ja isotrooppisen teorian halkeamakuormien vertailu.

Palkki	Koetuslos $P_h$ [kN]	Isotrooppinen teoria			
		min $P_h$ [kN]	$100 \cdot \frac{P_{koe} - P_{teoria}}{P_{koe}}$	$P_h (\theta=150^\circ)$ [kN]	$100 \cdot \frac{P_{koe} - P_{teoria}}{P_{koe}}$
1	67,6	36,1	46,6	36,4	46,2
2	63,1	29,1	53,9	30,4	51,8
3	102,6	37,6	63,4	39,4	61,6
4	114,1	77,1	32,4	77,1	32,4
5	178,9	68,2	61,9	69,6	61,1

Taulukko 7. Ympyräreikäisten koepalkkien ja anisotrooppisen teorian halkeamakuormien vertailu.

Palkki	Koetuslos $P_h$ [kN]	Anisotrooppinen teoria			
		min $P_h$ [kN]	$100 \cdot \frac{P_{koe} - P_{teoria}}{P_{koe}}$	$P_h (\theta=140^\circ)$ [kN]	$100 \cdot \frac{P_{koe} - P_{teoria}}{P_{koe}}$
1	67,6	80,1	-18,5	81,6	-20,7
2	63,1	71,0	-12,5	73,5	-16,5
3	102,6	81,6	20,5	81,6	20,5
4	114,1	172,8	-51,4	172,8	-51,4
5	178,9	156,6	12,5	156,6	12,5

tuloksen suuri ero johtuu siitä, että palkkiin syntyi halkeama epäonnistuneeseen liimasaumaan, jolloin palkin halkeama- ja murtokuormat jäivät pieniksi. Palkki 4 oli ainoa, joka murtui liimasaumaa pitkin. Jättämällä palkki 4 käsittelyn ulkopuolelle ovat koe- ja teorialtulosten erot -18,5, -12,5, 20,5 ja 12,5 prosenttia. Puumateriaalin heterogeenisyydestä johtuen on koetulosten ja anisotrooppisen teorian tulosten välinen vastaavuus erittäin hyvä ja teoriaa voidaan pitää riittävän tarkkana ympyräreikäisten liimapuupalkkien käytännön mitoitusmenetelmäksi.

Taulukon 7 yksinkertaisemman mitoitusmenetelmän halkeamakuormatulokset  $P_h (\theta = 140^\circ)$  antavat myös varsin tarkkoja tuloksia. Koe- ja teorialtulosten erot ovat -20,7, -16,5, 20,5 ja 12,5 prosenttia. Yksinkertaisemman mitoitusmenetelmän tarkkuus on erittäin lähellä tarkemman menetelmän tarkkuutta. Tämän vuoksi käytännön mitoitusmenetelmänä suositellaan käytettäväksi yksinkertaisempaa menetelmää, jossa jännitys lasketaan ainoastaan  $\theta$ :n arvolla  $140^\circ$  ja verrataan sitä vastaavaan murtoehdon arvoon  $f_{t140^\circ}$ .

Ympyräreikäisten koepalkkien ensimmäiset halkeamat syntyivät taulukon 5 mukaisesti keskimäärin  $\theta$ :n arvolla  $124^\circ$ , joka poikkeaa teoreettisesta ar-

vosta 140<sup>0</sup>. Reiän reunalla olevat paikalliset viat vaikuttavat oleellisesti halkeamien sijaintipaikkaan.

Taulukko 8. Reiällisten koepalkkien halkeamakuormien ja reiättömien koepalkkien laskennollisten murtokuormien vertailu.

Palkki	Murtokuorma ilman reikää $P_m$ [kN]	Halkeamakuorma $P_h$ [kN]	$100 \cdot \frac{P_m - P_h}{P_m}$
1	133,6	67,6	49,4
2	133,6	63,1	52,8
3	133,6	102,6	23,2
4	331,8	114,1	65,6
5	331,8	178,9	46,1

Taulukossa 8 on tarkasteltu kuinka paljon reiät ovat pienentäneet koepalkkien laskennollisia murtokuormia. Kaikkien koepalkkien keskimääräinen murtokuormien pienentyminen on 47,4 %. On huomattava, että koepalkkien reiät olivat suurimmaksi osaksi tehty mahdollisimman suurikokoisiksi, jotta reiän vaikutus näkyisi selvästi koetuloksista. Palkissa 3 oli muita palkkeja pienikokoisempi reikä, jolloin murtokuorman pieneneminen oli vain 23,2 %. Taulukon 8 tulokset osoittavat kuitenkin, että liimapuupalkin suurikokoinen reikä pienentää palkin kantokykyä huomattavasti ja reiän vahvistamisella voitaisiin palkin kapasiteettia selvästi nostaa.

#### YHTEENVETO JA LOPPUPÄÄTELMÄT

Ympyräreikäisen palkin anisotrooppisen teorian murtolujuustulokset poikkesivat koetuloksista keskimäärin 15 %, joten teorian tarkkuus on riittävä käytännön mitoitusmenetelmäksi. Mitoitusmenetelmä on kuitenkin varsin herkkä puumateriaalin sallittuun syytä vastaan kohtisuoraan vetolujuuteen nähden ja puurakenteiden suunnitteluohjeiden varsin konservatiiviset  $f_{t\perp}$ -arvot pienentävät reikäpalkin sallittua kuormitusta varsin huomattavasti. Koepalkkien suurikokoiset reiät pienensivät ehjien palkkien laskennollisen murtokuorman noin puoleen. Käyttämällä puurakenteiden suunnitteluohjeiden puun syytä vastaan kohtisuoria vetolujuusarvoja reiällisten palkkien sallittu kuorma putosi 1/5...1/3-osaan ehjien palkkien sallitusta kuormasta. Kuten kuvista 6 ja 7 nähdään myös halkaisijaltaan pienet reiät aiheuttavat merkittäviä jännitysarvoja reiän mitoittavassa kohdassa ja siten pienentävät liimapuupalkin kapasiteettia lähes yhtä paljon kuin suuretkin reiät.

Erityisesti jos liimapuupalkin reiät sijaitsevat palkin tukialueen läheisyydessä, niiden vaikutus olisi tarkistettava ja palkki olisi tarpeen vaa-

tiessa vahvistettava. Edellä esitetyn teorian avulla on tutkimusta jatkettu ruuveilla vahvistettujen palkkien mitoitusohjeiden laatimiseksi.

#### KIRJALLISUUTTA

- [1] Johannesson, B., Holes in plywood beams and glued laminated timber beams. Göteborg 1977. Chalmers Tekniska Högskola. Inst. avd. stål- och träbyggnad. Publ. S 77:4.
- [2] Keylwerth, R., Die anisotrope Elastizität des Holzes und der Lagenhölzer, VDI-Forschungsheft 430, Ausgabe B 17 (1951). 40 s.
- [3] Kolb, H. & Frech, P., Untersuchungen an durchbrochenen Bindern aus Brettschichtholz. Holz als Roh- und Werkstoff, 35 (1977) s. 125...134.
- [4] Kollman, F. & Cote, W., Principles of wood science and technology. Part I Solid wood. Springer-Verlag. 592 s.
- [5] Lekhnitskii, S.G., Theory of elasticity of an anisotropic elastic body. San Fransisco 1963. 401 s.
- [6] Muskhelishvili, N.I., Some basic problems of the mathematical theory of elasticity. Groningen-Holland 1953. 704 s.
- [7] Penttala, V., Reiällinen liimapuupalkki. Helsingin teknillinen korkeakoulu, Rakennetekniikan laitos, julkaisu 33. Otaniemi 1980. 101 s.
- [8] Penttala, V., Reiät ja lovet liimapuupalkeissa. Helsinki 1980. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus. Julkaisu 161-80, Puurakenteiden valinta ja mitoitus, 15 s.
- [9] Savin, G.N., Stress concentration around holes. London 1961. 430 s.

*Vesa Penttala, apul.prof., Teknillinen korkeakoulu, Rakennusinsinööriosasto.*