

Kirsti Wright

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 19
No 2 1986, s. 56...69

TIIVISTELMÄ: Murtumissitkeys säröä avaavassa kuormitustapauksessa voidaan yksinkertaisesti määrittää ASTM-standardin mukaan CT-koekappaleita käyttämällä. Eri ortotropiasuunnissa on saatu männyllä murtumissitkeyden arvoksi 200-360 kNm^{-3/2} ja kuuselle 200-340 kNm^{-3/2}. Variaatiokertoimet olivat noin 10 %. Arvot vastaavat kirjallisuudessa esiintyneitä.

Jos murtumissitkeyttä pidetään suoraan verrannollisena tiheyteen, saadaan koko aineistolle korrelaatioksi $R^2 = 0,59$ ja männyllä $R^2 = 0,60 - 0,61$. Verrannollisuuskertoimet olivat koko aineistolle noin 0,94 N m^{3/2}g⁻¹ ja mäntykoekappaleille noin 0,87 N m^{3/2}g⁻¹ ja ne vaihtelevat ortotropiasuunnan ja materiaaliominaisuuksien mukaan.

Parempia korrelaatioita saadaan, kun murtumissitkeyttä tarkastellaan tiheyden neliön ja muiden muuttujien lineaarisena yhdistelmänä: koko aineistolle $R^2 = 0,77 - 0,78$ ja männyllä 0,82.

MURTUMISMEKANIIKAN SOVELTAMINEN PUUHUN

VTT:n rakennetekniikan laboratorion projekti "Murtumismekaniikan soveltaminen puuhun" on edennyt loppusuoralle: Projektissa on tehty laaja kirjallisuustutkimus (Wright & Leppävuori 1984), jossa kartoitettiin murtumismekaniikan soveltamisen perusteita ja osa-alueita. Keskeinen soveltamista vaikeuttava ja rajoittava tekijä on puun ortotrooppisuus, joka yleensä johtaa yhdistettyihin murtumistapoihin rakenteellisesti mielenkiintoisissa tapauksissa.

Nyt on keskitytty materiaalivakioiden K_C määrittämiseen, ja ensimmäiseksi tuloksia saatiin tavan I mukaisesta murtumisesta. Tässä kirjoituksessa referoidaan pääasiassa Wrightin (1986) tutkimusta, lisäksi on analyysiin otettu mukaan Fonseliuksen diplomityön (1986) kuusikoekappaleiden tuloksia. Tavan II mukaisia kokeita on tehty sekä lyhyt- että pitkäaikaisen kuormituksen vaikutuksessa. Näitä tietoja voidaan käyttää hyväksi kirjallisuustutkimuksessa esitellyissä sovelluksissa, joista tärkeimmät lienevät särönkasvu, kokovaikutus ja lujuuslajittelu.

KOEMATERIAALI

Tutkimusta varten VTT:n Puulaboratorio valitsi Viitasaarelta, Nurmekselta ja Veitsiluodosta ulkokuivaa mahdollisimman virheetöntä mäntysahatavaraa. Kuusi puuta saatiin Viitasaarelta, lisäksi käytettiin rakennetekniikan laboratoriossa ollutta kevyttä kuusta. Seuraavien tekijöiden vaikutusta haluttiin tutkia.

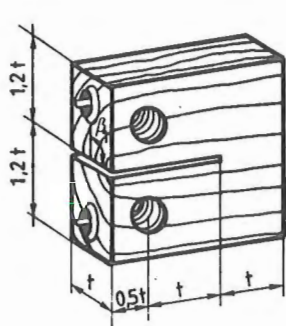
- Kasvupaikan vaikutusta voidaan tutkia männyn osalta. Kuusesta kasvupaikan vaikutusta ei voi selvittää.
- Nopeuden vaikutusta tutkittiin sekä männyn että kuusen osalta. Kuusen tulos ei välttämättä ole edustava alhaisen ominaispainon takia.
- Kappaleen koon vaikutusta tutkittiin vaihtelemalla mäntykoekappaleiden paksuutta välillä 12-50 mm.
- Vuosirengaskulman vaikutusta tutkittiin vertaamalla männyn eri murtumistapauksia. Koska männyn ja kuusen ydinsäteiden määrät ovat lähellä toisiaan, on tulos suuntaa-antava myös kuuselle.

Seuraavat tekijät pyrittiin vakioimaan (kosteus) tai niiden vaihtelu johtuu luonnon olosuhteista.

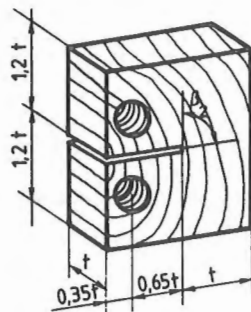
- Koekappaleiden kosteus asetui kosteushuoneen suhteellista kosteutta 80 % vastaavaan tilaan.
- Tiheys laskettiin kuiva-tuoretiheydeksi. Kuusen eri painoryhmien tuloksia vertaamalla saadaan käsitys laaja-alaisesta tiheyden vaihtelusta. Männyn tiheyden vaikutusta voi tutkia luonnollisen tiheysspektrin mukaisesti.
- Vuosirengasvälin ja kesäpuuprosentin vaikutukset tulevat esiin luonnollisen vaihtelun mukaan ryhmäkohtaisesti. Kuusien vuosirengasväli oli keskimäärin suurempi ja kesäpuuprosentti keskimäärin pienempi kuin männyllä. Koska näiden tekijöiden välillä voi olla yhteisvaikutusta, on eri puulajien arvojen vertailuun suhtauduttava varovaisuudella. Kesäpuuprosentti mitattiin visuaalisesti havaittavana tiiviimmän puun osuutena.

Koska tutkimuksessa haluttiin selvittää virheettömän puun ominaisuuksia, hylättiin sellaiset koekappaleet, joissa oli oksia tai muita vikoja tai jotka säilytyksen aikana halkesivat.

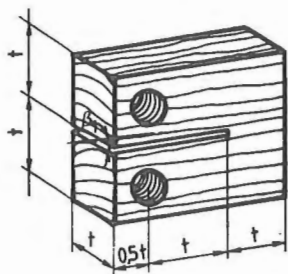
Alkuperäisessä aineistossa kuusikoekappaleiden tiheys ja suunta olivat epäedullisesti ryhmittyneet. Tästä syystä käytetään myös Fonseliuksen diplomitöön (1986) kuusiaineistoa määritettäessä männylle ja kuuselle yhteisiä regressioyhtälöitä.



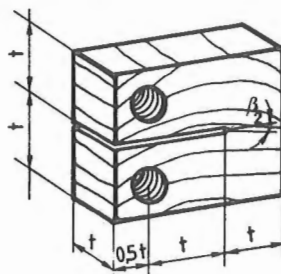
TL



TR



RL



RT

Rakennetekniikan laboratoriossa käytettyjä koekappaleita. Siirtymäanturi kiinnitettiin painonappien avulla vakioetäisyydelle. Kappaleet rikottiin vetämällä rei'istä vakionopeudella. Alkuhalkeama sahattiin vannesahalla ja viimeisteltiin hyvin ohutteräisellä sahalla.

TL-tapauksessa tutkitut paksuudet olivat 12, 25, 40 ja 50 mm. Mitat valittiin normaalin ASTM-standardin perusteella. RL-, TR- ja RT-tapauksissa täysikokoisia 25 mm paksuja koekappaleita ei voitu tehdä, vaan käytettiin jonkin verran poikkeavia mittoja.

Syitä vastaan kohtisuoria halkeamia, LT- ja LR-tapauksia tutkittiin mitoiltaan samanlaisilla koekappaleilla kuin TL- ja TR-tapauksia.

MURTUMISSITKEYSKOKEET

Useista mahdollisista koekappaleityypeistä valittiin CT-koekappale, koska se on standardisoitu metalleille (ASTM E399-81) ja koska syiden suuntaisten halkeamien tutkiminen sen avulla on helppoa. Koska koekappaleita ei haluttu koota liimaamalla ja kappaleiden vähimmäispaksuudeksi valittiin 25 mm, jouduttiin eri suuntia tutkittaessa käyttämään standardista poikkeavia mittoja.

Koekappaleet kuormitettiin vakionopeuskuormituskoneella. Joka kuormituksesta piirrettiin piirturilla voima-siirtymäkäyrä. Siirtymä mitattiin kappaleen otsapinnasta induktiivisella anturilla ja voima kappaleen kiinnityskohdasta. Kuormitus keskeytettiin, kun maksimikuorma oli saavutettu.

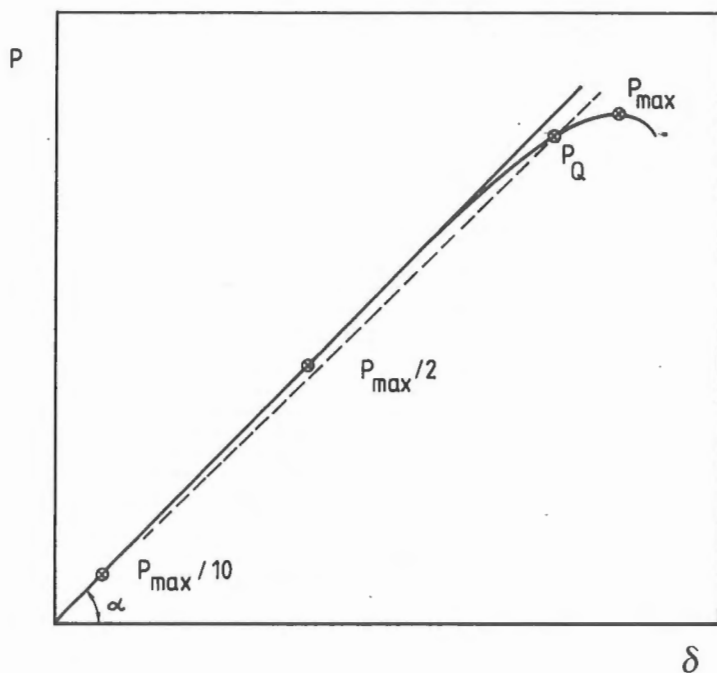
Tulokset analysoitiin pääpiirteittäin samoin kuin ASTM-standardissa. Puun materiaaliominaisuuksista johtuen sallittiin suurempi voima-siirtymäkäyrän epälineaarisuus. Ryhmäkohtaisia ehtoja tarvitaan varmistamaan riittävä määrä hyväksytyjä kokeita ryhmää kohti.

Särön yhdistäminen tehtiin viiltämällä. Näin syntyvä halkeamarintama on riittävän suora, jotta halkeaman pituus voidaan mitata kappaleen pinnalta.

Murtumissitkeys laskettiin kuten isotrooppiselle aineelle (esim. Rolfe & Barsom 1977)

$$\begin{aligned} K_Q &= \frac{P}{bw} a^{1/2} Y = \\ &= \frac{P_Q}{bw} \left(29,6 \left(\frac{a}{w}\right)^{1/2} - 185,5 \left(\frac{a}{w}\right)^{3/2} + 655,7 \left(\frac{a}{w}\right)^{5/2} - \right. \\ &\quad \left. - 1017,0 \left(\frac{a}{w}\right)^{7/2} + 638,9 \left(\frac{a}{w}\right)^{9/2} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

jossa a on halkeaman pituus, w koekappaleen leveys rei'istä lukien ja b koekappaleen paksuus.



Piirturitulostuksen arvostelu.

- Luetaan maksimikuorma P_{max} .
- Piirretään suora viiva käyrän pisteiden $P_{max}/2$ ja $P_{max}/10$ kautta.
- Piirretään sekantti, jonka kaltevuus on 5 % pienempi.
- Luetaan rajakuorma P_Q sekantin ja käyrän leikkauspisteestä.

Ominaisuus	Käytetty hyväksymiskriteeri	ASTM:n hyväksymiskriteeri
------------	--------------------------------	------------------------------

Yksittäinen testi

Alkukaltevuus $k = \tan \alpha$	$0,7 < k < 1,4$	$0,7 < k < 1,1$
Epälineaarisuus P_{max}/P_Q	$P_{max}/P_Q < 1,2$	$P_{max}/P_Q < 1,1$

Ryhmän keskiarvo

Alkukaltevuus $k = \tan \alpha$	$0,84 < k < 1,19$
Epälineaarisuus P_{max}/P_Q	$P_{max}/P_Q < 1,16$

Anisotrooppisella aineella Walsh (1972) on osittanut, että koekappaleen madaltaminen ei vaikuta laskelmalliseen K_Q -arvoon. Sen sijaan kappaleen kaventaminen (TR- ja LR-koekappaleet) muuttaa sekä keskimääräistä jännitystä että suhdetta a/w . Käytetyllä muodolla $a/w = 0,394$ ja $f(a/w) = 7,216$. Murtumissitkeyden kerroin $f(a/w)/w$ on normaalimuotoisille kappaleille $9,60/1 = 9,60$ ja kavennetuille $7,216/0,825 = 7,94$, joten kuormia verrattaessa kavennettujen kappaleiden kuormat on kerrottava luvulla 1,2.

LT- ja LR-koekappaleita kuormitettiin kolmella eri säröpituuden arvolla. Jos murtuminen olisi tapahtunut murtumismekaniikan mukaisesti jännitysintensiiteetin ylittäessä murtumissitkeyden, olisi murtokuormien suhdetta voitu arvioida yhtälön (1) avulla. Jos taas murtuminen tapahtuu taivutuslujuuden ylittymisen vuoksi, suhtautuvat murtokuormat toisiinsa kuten halkeamanpituudet kääntäen. Mitatut murtokuorman arvot ovat lähempänä taivutuslujuushypoteesin edellyttämiä.

Standardissa esitetään kokovaatimus, jotta saatu K_Q :n arvo olisi kelvollinen K_C :n estimaatti. Kun käytetään LT- ja LR-kokeista laskettuja taivutuslujuuden arvoja $2,48 \text{ MN/m}^2$ ja $4,39 \text{ MN/m}^2$, sekä keskimääräistä murtumissitkeyttä, saadaan TR- ja TL-kappaleiden vaadituksi paksuudeksi 36 mm sekä RT- ja RL-kappaleiden vaadituksi paksuudeksi 5 ja 21 mm. Nyt eri suuntien vertaamiseen käytetyt 25 mm koekappaleet antanevat hiukan liian suuria arvoja TR- ja TL-tapauksina. Käytettävää kokoa kuitenkin rajoittaa olemassaolevan sahatavaran mitat: halkeilematta ei nyt käytettyä järeämpää juuri saa.

Kosteuden vaikutus

Hitaalla kuormitusnopeudella 5 mm/min rikutut mäntykoekappaleet jaettiin kahteen 12 kpl:n ryhmään. Toisen ryhmän kappaleet kuivattiin 3 h 105°C lämpökaapissa. Sen jälkeen molemmat ryhmät kuormitettiin uudelleen vakionopeudella 10 mm/min. Koekappaleiden maksimikuormat luettiin kuorma-siirtymäkäyrästä ja mitattiin värjäyksen avulla halkeaman kasvu aikaisemmassa kuormituksessa (Δa). Halkeaman eteneminen oli yleensä epätasaista; halkeamarintama oli kaareva ja osittain epäyhtenäinen, mikä näkyi murtopinnan tikkuisuutena. Ei ole perusteltua laskea minkäänlaista murtumissitkeysarvoa uusista kuormitustuloksista, vaan maksimikuormia verrattiin sellaisenaan. Kosteina ($\bar{u} = 18 \%$) vedetyille kappaleille saatiin suurempi murtokuorma, keskiarvo $P_{\max} = 240 \text{ N}$. Kuivatettujen kappaleiden kosteus oli keskimäärin 5 % ja murtokuorman keskiarvo $P_{\max} = 176 \text{ N}$. Ero murtokuormissa on tilastollisesti merkittävä. Maksimikuorman ja halkeaman kasvun Δa välille saadaan regressioyhtälöt

$$P_{\max} = 410 - 10 \Delta \bar{a} \quad ; \quad \rho = 0,51 \quad ; \quad \text{kosteus } 18 \% \quad (2)$$

$$P_{\max} = 360 - 11 \Delta \bar{a} \quad ; \quad \rho = 0,52 \quad ; \quad \text{kosteus } 5 \% \quad (3)$$

Halkeaman pituuden muutoksessa eri ryhmien välillä ei ollut tilastollisesti merkittävää eroa - halkeaman kasvu oli keskimäärin 17,5 mm. Regressioyhtälöissä on myös lähes sama kerroin halkeaman pituuden vaihtelulle. Voidaan päätellä, että murtokuormien ero johtuu pääasiassa kosteuden muutoksesta. Koska kirjallisuustutkimuksessa löydettiin ristiriitaisia tietoja kosteuden vaikutuksesta murtumissitkeyteen, olisi ilmeisen tärkeää tutkia kosteuden vaikutusta yksityiskohtaisemmin eri kosteuksia (5, 10, 15, 20, 25 %) käyttäen. Tällöin on suotavaa, että kosteampia koekappaleita ei ole välillä kuivattu kuivemmiksi kuin koekuormitushetken nimelliskosteus, ettei hienorakenteessa ole ehtinyt tapahtua palautumattomia muutoksia.

TULOKSET

Tuloksia analysoitiin tilastollisesti, jolloin tarkistettiin aineiston normaalisuutta, vertailtiin eri ryhmien arvoja sekä etsittiin regressioanalyysin avulla mahdollisia riippuvaisuuksia parametrien välillä. Männyllä havaittiin vuosirengasvälin ja murtumissitkeyden jakautumien poikkeavan normaalista. Kuusella taas tiheyden ja murtumissitkeyden jakautumat olivat odotetusti kaksihuippuisia.

Kasvupaikan perusteella ryhmiteltäessä ei mäntykoekappaleilla ollut eroa kosteudessa, tiheydessä tai kesäpuun määrässä. Pohjoisen puulla oli merkittävästi pienempi vuosirengasväli. TL-RL tapauksissa ei männyn murtumissitkeydessä havaittu kasvupaikan tai eri kuormitusnopeuksien 5, 10 ja 20 mm/min aiheuttamia eroja. Kuusella pienin kuormitusnopeus johti pienempään murtumissitkeyteen kuin käytetty suurin nopeus.

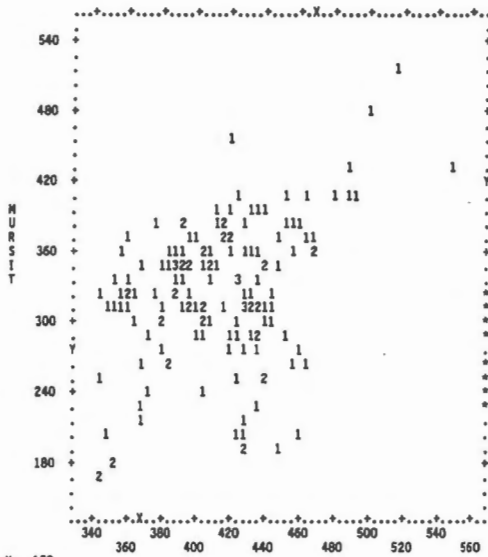
Koon vaikutusta tutkittiin vain mäntykoekappaleilla. Pienimmillä 12 mm koekappaleilla kokeen häiriötön suoritus ja hallittu arvostelu olivat ilmeisesti vaikeat ja tulokset olivat huonommat kuin 25 mm ryhmässä, vaikka jälkimmäiseen oli otettu mukaan myös heikot murtumistapaukset TR ja RT. 40 mm ja 50 mm paksuilla koekappaleilla saaduilla tuloksilla ei ollut eroa.

Voidaan päätellä, että jos koekappaleen koko on sahatavarasta luonnollisesti saatava ja käsittelyn kannalta riittävän suuri, ei koolla tai kuormitusnopeudella ole merkitystä. Sensijaan vuosirengaskulma ja murtumistapaus vaikuttavat voimakkaasti. Aineiston epäedullisen ryhmittymisen vuoksi kuusi-koekappaleiden tiheyden ja vuosirengaskulman vaikutukset peittävät toisensa.

Männylle saatiin RL-tapauksessa suurin murtumissitkeys, $360 \text{ kNm}^{-3/2}$, TL-tapauksessa $330 \text{ kNm}^{-3/2}$ sekä 25 mm paksuilla kappaleilla TR-tapauksessa $290 \text{ kNm}^{-3/2}$ ja RT-tapauksessa $210 \text{ kNm}^{-3/2}$. Vaikka pienillä koekappaleilla saatiin TL-tapauksessa jonkin verran pienempiä murtumissitkeyden arvoja kuin suurilla, ei ero ollut tilastollisesti merkitsevä.

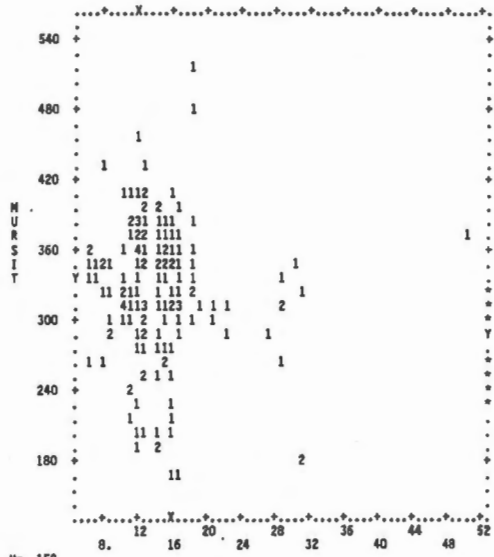
Alkuperäisessä aineistossa kuuselle saatiin murtumissitkeydeksi $305 \text{ kNm}^{-3/2}$ RL-tapauksessa. TL-tapauksen arvo liittyy tavallista alhaisempaan tiheyteen. Fonseliuksen diplomityössä (1986) kuuselle saatiin murtumissitkeydeksi $340 \text{ kNm}^{-3/2}$ RL-tapauksessa, $240 \text{ kNm}^{-3/2}$ TL-tapauksessa, $230 \text{ kNm}^{-3/2}$ TR-tapauksessa ja $200 \text{ kNm}^{-3/2}$ RT-tapauksessa. Koekappaleiden paksuus oli 20 mm. Fonselius on kirjallisuustietojen perusteella arvioinut 10 mm paksun koekappaleen riittävän, jotta kokovaikutusta ei esiintyisi. Kuitenkin männylle lasketut vähimmäispaksuudet viittaavat siihen, että Fonseliuksen murtumissitkeysarvot ovat jonkin verran suuria. Kun kappaleen koko otetaan regressioanalyysissä muuttujaksi, voidaan näitä tuloksia hyvin käyttää kuusisarjan täydentämiseksi.

Korrelaatiotesteissä ei nollasta merkitsevästi poikkeavia korrelaatioita juuri löytynyt. Alkuperäisessä aineistossa kuusella tiheyden lisäksi ainoastaan nopeuden ja murtumissitkeyden välillä saattaisi olla yhteyttä. Männyllä TL-RL murtumistapauksissa tiheys ja vuosirengaskulma korreloivat murtumissitkeyden kanssa. Silmämääräistä tarkastelua varten esitettiin murtumissitkeyden riippuvaisuus muista muuttujista myös x-y-piirrosten avulla arvoparien muodostamina pistejoukkoina. Näistä voidaan todeta havainnollisesti aineiston suuri hajonta. Riippuvaisuuksien heikkous ilmenee siten, että jopa korrelaation merkki määräytyy usein parin yksittäisen pisteen perusteella. Aineisto noudattelee luonnollista tiheys- vuosirengasväli- ja kesäpuuosuusjakautumaa. Ääriarvoja on vähän ja saadut tulokset kuvaavat paremminkin keskiarvoja kuin riippuvaisuuksia.



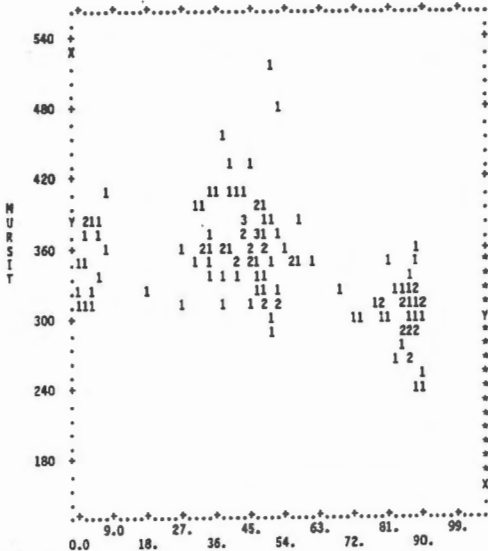
N= 158
COR= .3682

	MEAN	ST.DEV.	REGRESSION LINE	RES.MS.
X	412.31	37.383	$X = .22702 * Y + 338.91$	1215.8
Y	323.30	60.627	$Y = .59709 * X + 77.113$	3197.7



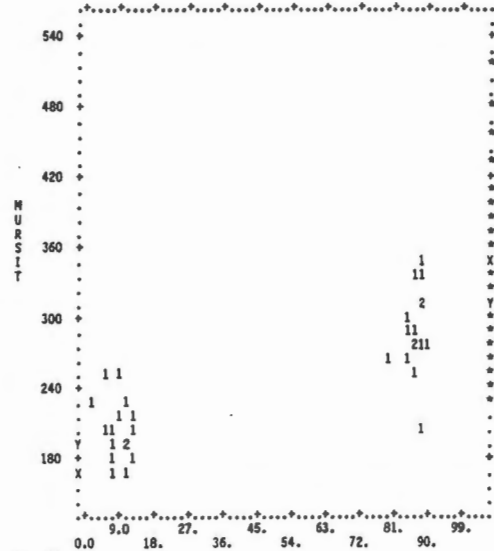
N= 158
COR= -.1012

	MEAN	ST.DEV.	REGRESSION LINE	RES.MS.
X	14.532	5.6958	$X = -.00951 * Y + 17.607$	32.319
Y	323.30	60.627	$Y = -1.0776 * X + 338.96$	3661.2



N= 126
COR= -.4863

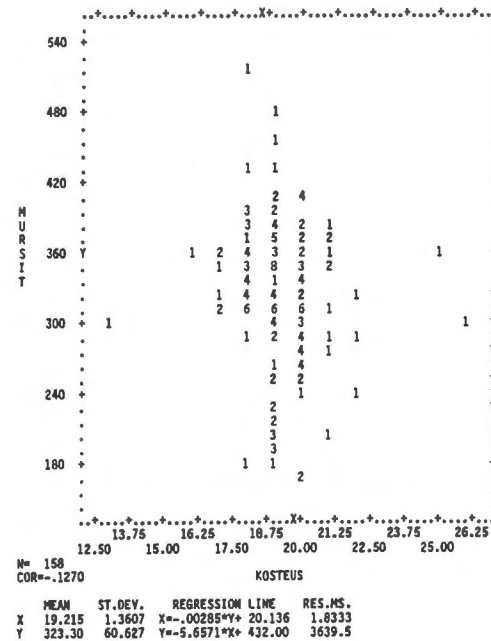
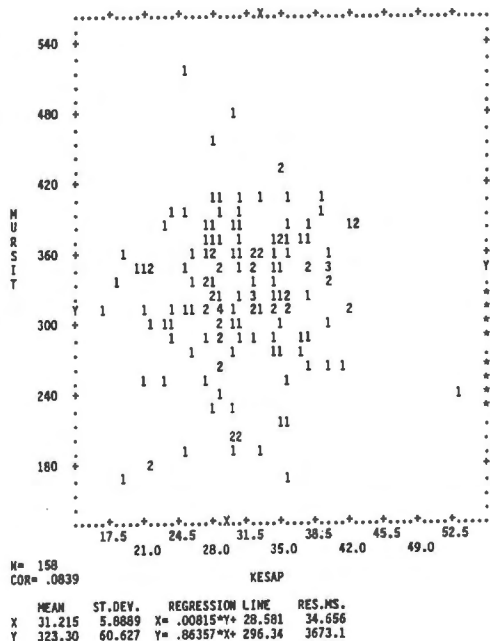
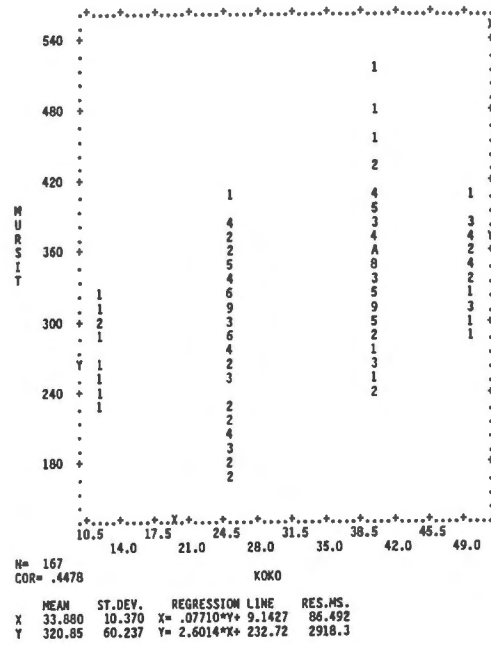
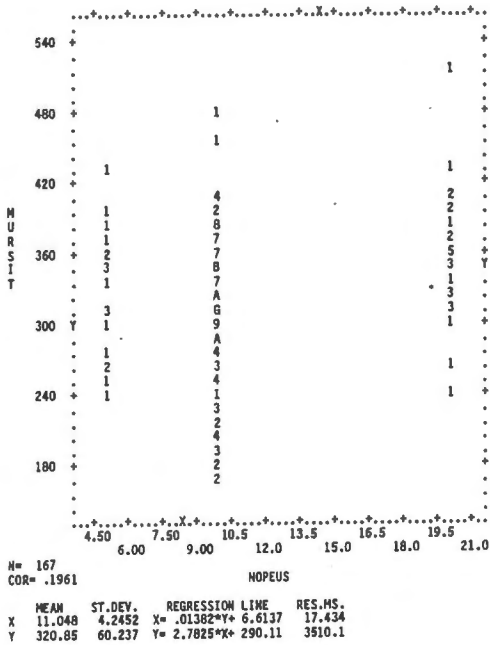
	MEAN	ST.DEV.	REGRESSION LINE	RES.MS.
X	51.206	26.913	$X = -.28964 * Y + 150.51$	557.45
Y	342.84	45.188	$Y = -.81655 * X + 384.66$	1571.6



N= 32
COR= .8038

	MEAN	ST.DEV.	REGRESSION LINE	RES.MS.
X	47.563	39.602	$X = .61047 * Y - 102.83$	574.36
Y	246.35	52.123	$Y = 1.0575 * X + 196.05$	994.96

Männyn murtumissitkeyden riippuvaisuus tiheydestä, vuosirengasvälistä ja vuosirengaskulmasta. Kulma 1 liittyy murtumistapauksiin TL-RL, kulma 2 tapauksiin TR-RT.



Männyn murtumissitkeyden riippuvaisuus nopeudesta, koosta, kesäpuu-
prosentista ja kosteudesta.

Muuntamalla muuttujia siten, että murtumistapausta kuvaava kulmamuuttuja tulee jatkuvaksi ja vuosirengasvälin asemasta käytetään sen vuosirengaskulman mukaan korjatun leveyden neliöjuurta saadaan männylle useilla eri tiheys - kulmamuuttuja - vuosirengasvälimuuttuja - koko yhdistelmillä varsin hyviä korrelaatioita: $R^2 = 0,65$. Kuuselle aineiston ryhmittyyneisyyden vuoksi saadaan kulma - tiheys - kosteus yhdistelmillä korrelaatioiksi $R^2 = 0,80 - 0,81$.

Koska tiheys hallitsee regressioanalyysiä ja koska kirjallisuudessa esiintyy tieto murtumissitkeyden verrannollisuudesta tiheyteen, laskettiin regressioanalyysillä myös verrannollisuuskertoimelle arvo. Verrannollisuuskerroin on männyllä riippuvainen vuosirengaskulmasta ja -välistä, koosta ja kosteudesta. Korrelaatio ei ollut aivan yhtä hyvä kuin aikaisemmin: $R^2 = 0,60 - 0,61$. Kuusella verrannollisuuskerroin on riippuvainen vain vuosirengaskulmasta; korrelaatio R^2 oli $0,63 - 0,69$.

Tyypillisiä regressioyhtälöitä männylle olivat

$$K_{IC} = 58,6 + 0,621 \rho + 471 \cos\beta - 337 \cos^2\beta - 20,8 b^{1/2} + 14,26 (d/\cos\beta)^{1/2} \quad (4)$$

$$K_{IC} = 2,12 + 0,619 \rho + 457 \cos\beta - 326 \cos^2\beta - 1,70 b + 16,10 ((1 - p) d/\cos\beta)^{1/2} \quad (5)$$

$$K_{IC}/\rho = 1,29 + 1,03 \cos\beta - 0,730 \cos^2\beta - 0,0107 \rho/u + 0,0308 (d/\cos\beta)^{1/2} - 0,0431 b^{1/2} - 0,0158 u \quad (6)$$

ja kuuselle

$$K_{IC} = 67,0 + 89,6 \cos^2\beta + 0,510 \rho \quad (7)$$

$$K_{IC} = 204 - 1,21 \beta + 0,407 \rho \quad (8)$$

$$K_{IC}/\rho = 0,718 + 0,248 \cos^2\beta \quad (9)$$

missä ρ on tiheys kg/m^3 , β vuosirengaskulma, b koekappaleen paksuus mm, d vuosirengasväli mm, p kesäpuuprosentti ja u kosteusprosentti. Näissä yhtälöissä esiintyvät kertoimet ovat tilastollisesti merkitseviä.

Verrattuna T-testien tuloksiin havaitaan tiheys- ja vuosirengaskulman lisäksi koko ja vuosirengasväli merkitseviksi muuttujiksi.

Yhtälöiden (4) ja (5) mukaan murtumissitkeys pienenee TL-tapauksessa $130 \text{ kNm}^{-3/2}$ verrattuna RL-tapaukseen. Kappaleen koon kasvaessa 25 mm:stä

50 mm:n pienenee murtumismitkeyks 40 kNm^{-3/2}. Vuosirengasvälin kasvaessa 1,5 mm:stä 3,0 mm:n kasvaa murtumismitkeyks noin 10 kNm^{-3/2}. Kaikissa tapauksissa regressioanalyysiä käyttämällä saadaan ääriarvojen erotus suuremmaksi kuin T-testien ryhmäkeskiarvojen erotus. Tämä johtuu analyysimenetelmien välisestä erosta, eikä sinänsä voida sanoa että toinen on 'oikein' ja toinen 'väärin'. Regressioanalyysin tarkoituksena on eritellä eri muuttujien vaikutus, kun T-testi myös ottaa huomioon materiaaliominaisuuksien luonnollisen hajonnan.

TR ja RT tapauksissa ei regressioanalyysiä tehty. Koska aineisto on ryhmitetty kahdeksi ryhmäksi, on jo pelkän kulmamuuuttujan ja murtumismitkeyden välinen korrelaatio hyvä, R = 0,80. Myös lukumäärä on vähäinen, mikä estää luotettavien tuloksien saamisen.

Wrightin (1986) keräämään aineistoon yhdistettiin Fonseliuksen diplomityön (1986) kuusiaineiston TL-RL tapaukset ja tulokset analysoitiin kokonaisuutena. Fonseliuksen aineistosta otettiin mukaan ilman suhteellisia kosteuksia 50 % ja 80 % vastaavat koekappaleet, joiden perusteella murtumismitkeyks ei vaikuttanut olevan riippuvainen kosteudesta. Parhaiksi regressioyhtälöiksi saatiin

$$K_{IC} = 238 + 0,000753 \rho^2 - 0,0252 \beta^2 + 1,41 \beta + 1,52 \dot{\epsilon} - 0,955 b \quad (10)$$

$$K_{IC} = 153 + 0,000754 \rho^2 + 223 \cos\beta - 135 \cos^2\beta + 1,47 \dot{\epsilon} - 0,796 b \quad (11)$$

missä $\dot{\epsilon}$ on kuormitusnopeus. Korrelaatiot R^2 olivat 0,77 - 0,78. Kun murtumismitkeyks jaetaan tiheydellä saadaan jonkinverran huonompia korrelaatioita, R^2 oli 0,60, ja yhtälöt

$$K_{IC}/\rho = 1,07 - 0,0000620 \beta^2 - 0,000550 \rho + 0,00366 \dot{\epsilon} + 0,00330 \beta - 0,00279 b + 0,00405 u \quad (12)$$

ja

$$K_{IC}/\rho = 0,848 + 0,536 \cos\beta - 0,000542 \rho - 0,304 \cos^2\beta + 0,00356 \dot{\epsilon} - 0,00228 b + 0,00364 u. \quad (13)$$

Jos yhdistettyä aineistoa kuvataan regressioyhtälöllä on

$$K_{IC} = -1,03 + 1,13 \ln p \quad , \quad \text{eli} \quad (14)$$

$$K_{IC} = 0,357 \rho^{1,13} \quad , \quad (15)$$

saadaan korrelaatioksi $R^2 = 0,43$.

Tämä on suunnilleen sama kuin murtumissitkeyden ja tiheyden välinen korrelaatio $R^2 = 0,44$.

Tyyppiä

$$K_{IC} = \rho^{Ax_1 + Bx_2 + Cx_3 \dots} \quad (16)$$

olevista yhtälöistä parhaat olivat

$$\begin{aligned} \ln K_{IC}/\ln p &= 0,970 - 0,000112 \beta^2 + 0,000700 \epsilon \\ &+ 0,00134 u + 0,000525 \beta - 0,000439 b \\ &- 0,000316 p. \end{aligned} \quad (17)$$

ja

$$\begin{aligned} \ln K_{IC}/\ln p &= 0,925 + 0,0996 \cos \beta - 0,0519 \cos^2 \beta \\ &+ 0,000686 \epsilon + 0,00128 u \\ &- 0,000365 b - 0,000315 p \end{aligned} \quad (18)$$

Korrelaatiot olivat $R^2 = 0,59$.

Jos yhtälöiden (10) ja (11) mukainen regressioanalyysi suoritetaan vain mäntyaineistolle, saadaan korrelaatioksi 0,82 ja regressioyhtälöiksi

$$\begin{aligned} K_{IC} &= 201 + 0,000820 \rho^2 - 0,0390 \beta^2 + 2,88 \beta + 1,32 \epsilon \\ &- 2,71 u + 1,04 ((1 - p) d/\cos \beta)^{1/2} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} K_{IC} &= 137 + 0,000837 \rho^2 + 274 \cos \beta - 167 \cos^2 \beta \\ &+ 1,31 \epsilon + 1,20 ((1 - p) d/\cos \beta)^{1/2} - 2,72 u. \end{aligned} \quad (20)$$

Verrattaessa koko aineistoa kuvaavia yhtälöitä (10) - (18) keskenään, havaitaan että paras korrelaatio saadaan yksinkertaisilla yhtälöillä (10) ja (11). Voimakkaimmin murtumissitkeys on riippuvainen tiheyden neliöstä. Ei ole suurtakaan eroa sillä, käytetäänkö kulmamuuttujaa ja sen neliötä vai vastaa-

vasti kulman kosinia ja kosinin neliötä selittämään TL-RL suuntien eroa. Kuormitusnopeuden kasvaessa murtumissitkeys odotetusti kasvaa ja paksuuden kasvaessa pienenee. Kokovaikutus on kuitenkin heikko, mikä viittaa käytetyn koekappalekoon riittävyteen. Haettaessa oikeata eksponenttia tiheysriippuvaisuudella (14) voidaan myös verrata pelkkää mäntyaineistoa koskevia yhtälöitä (5) ja (20). Yhtälöillä (20) on parempi korrelaatiokerroin. Koska vuosirengasvälin ja tiheyden välillä vallitsee epälineaarinen yhteys, on yhtälössä (20) vuosirengasvälin merkitys pienempi kuin yhtälössä (5). Muiden muuttujien kuin tiheyden ja kulman merkitys kummassakin yhtälössä on selvästi näitä kahta vähäisempi.

Yhtälön (14) mukaan tiheyden eksponentti olisi suurempi kuin 1,0. Aikaisemmat tulokset ja yhtälöt (12) ja (13) viittaavat myös epälineaariseen murtumissitkeys-tiheys riippuvaisuuteen. Ilmeistä kuitenkin on, että yksinomaan tiheyden avulla ei voi arvioida murtumissitkeyttä, ellei lisäksi tiedetä kulmaa β , siis murtumistapausta; tällöin saadaan korrelaatioksi $R^2 = 0,76$.

Verrattaessa koko aineiston yhtälöitä (10) ja (11) mäntykoekappaleita kuvaaviin yhtälöihin (19) ja (20) havaitaan tiheyden neliön, kulmamuuttujien ja kuormitusnopeuden kertoimet varsin samanlaisiksi. Mäntyaineistossa kappaaleiden vuosirengasväli on noussut merkitseväksi muuttujaksi. Koko aineistossa tiheyden riippuvaisuus vuosirengasvälistä lienee niin voimakas, ettei vuosirengasväli erotu omaksi termikseen. Koko aineistossa pieni tiheys, pieni koko ja pieni murtumissitkeys kuuluvat yhteen. Siksi kokovaikutustermit yhtälöissä (10) ja (11) eivät voi johtua aineiston ryhmittyyneisyydestä.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Wrightin ja Fonseliuksen yhdistettyä aineistoa voidaan käyttää suomalaisen havupuun K_{IC} -arvojen määrittämiseen ja ennustamiseen. Eniten on tutkittu TL- ja RL-tapauksia, joissa murtumissitkeyttä voidaan kuvata regressioyhtälöillä (10) ja (11). Murtumissitkeys on voimakkaimmin riippuvainen tiheyden neliöstä ja kulmamuuttujasta. TL-tapauksessa saadaan $K_{IC} = 136 + 0,00075 \rho^2$ ja RL-tapauksessa $K_{IC} = 223 + 0,00075 \rho^2$, yksiköt $\text{kNm}^{-3/2}$ ja kg/m^3 .

TR- ja RT-tapauksissa on saatu keskimääräiset arvot männylle $K_{IC TR} = 290 \text{ kNm}^{-3/2}$ ja $K_{IC RT} = 210 \text{ kNm}^{-3/2}$ sekä kuuselle $K_{IC TR} = 230 \text{ kNm}^{-3/2}$ ja $K_{IC RT} = 200 \text{ kNm}^{-3/2}$. Alhaisimmat arvot ovat niin lähellä toisiaan, että männyn ja kuusen murtuminen tapahtunee samalla tavalla. Rengashalkeaman kasvua ei käytännössä useinkaan tapaa. Ilmeisesti sisäiset jännitykset suosivat TR ja TL-tyyppistä halkeaman kasvua.

Kirsti Wright, tekn. lis., Valtion teknillinen tutkimuskeskus, rakennetekniikan laboratorio