

**TIIVISTELMÄ:** Kertopuun murtumissitkeyttä säröä avaavassa kuormituksessa ei voida määrittää samalla tavalla kuin männylle ja kuuselle. Kertopuu on epälineaarista sekä sitkeää, mistä seuraa, että lineaaris-elastistinen murtumismekaniikka ei sovellu kertopuulle, vaan tulisi käyttää elastis-plastista murtumismekaniikkaa. Tässä tutkimuksessa on kuitenkin vertailua ja kehitystä varten määritetty kertopuun murtumissitkeys.

Murtumissitkeydeksi eri murtumistapauksissa saatiin  $K_{ICRL} = 231 \text{ kNm}^{-3/2}$ ,  $K_{ICTL} = 300 \text{ kNm}^{-3/2}$ ,  $K_{ICRT} = 129 \text{ kNm}^{-3/2}$  ja  $K_{ICTR} = 163 \text{ kNm}^{-3/2}$ . Kosteudessa 11 %, 12 % ja 15 % tehdyt kokeet eivät eroa toisistaan. Koekappaleiden lämpötilan alentaminen ei vaikuta murtumissitkeyteen. Kertopuun viilujen oksaisuus vaikuttaa tulokseen tutkitussa TL-tapauksessa.

#### JOHDANTO

Tässä kirjoituksessa referoidaan Fonseliuksen diplomityötä (1986) "Brottmekanisk studie på gran och skikträ". Referointi rajoittuu kertopuukokeiden analysointiin sekä koetuloksien esittämiseen. Yksittäisen CT-koekappaleen koekuormitus sekä analyysi perustuu metallistandardiin ASTM E399-81 joka on sovitettu puumateriaalille paremmin sopivaksi, Wright (1986).

Lei ja Wilson (1979) ovat tutkineet sahatuista douglaskuusi-viiluista valmistetun PLV:n (Parallel-Laminated-Veneer) murtumissitkeyttä. PLV:n todettiin olevan sekä lineaarinen että hauras materiaali. Koekappaleita valmistettiin murtumistapauksissa RL, TL, RT ja TR käyttäen viilupaksuutta 3,2 mm, 1,6 mm ja 0,8 mm. Murtumissitkeydeksi saatiin  $K_{ICRL} = 326 \text{ kNm}^{-3/2}$ ,  $K_{ICTL} = 300 \text{ kNm}^{-3/2}$ ,  $K_{ICRT} = 358 \text{ kNm}^{-3/2}$  ja  $K_{ICTR} = 392 \text{ kNm}^{-3/2}$  koekappaleille, joiden viilupaksuus oli 3,2 mm. Tulokset ovat noin 90 % alkuperäisen puumateriaalin douglaskuusen (Pseudotsuga menziesii) murtumissitkeydestä. PLV:n ortotropialla oli sama vaikutus tuloksiin kuin douglaskuusen ortotropialla. Kun viilupaksuus oli 1,6 mm, saatiin vastaavanlaiset tulokset. Kun viilupaksuutta pienennettiin 0,8 mm:iin niin ortotropian vaikutus hävisi ja murtumissitkeydet olivat 110-120 % douglaskuusen murtumissitkeydestä lukuunottamatta

TR-tapausta missä tulos oli 85 % alkuperäisen puumateriaalin koetuloksesta.

Kertopuun osalta tutkimuksen tavoitteena oli selvittää mahdollisuudet määrittää murtumismitkeyden vastaavalla menetelmällä, jota aikaisemmin on sovellettu männyille ja kuuselle. Esikokeiden avulla tutkittiin kertopuun mahdollista lineaarisuutta sekä murtumiskäyttäytymistä. Selvitettiin, miten kertopuun murtumismitkeyden tulisi määrittää. Ortotropian, kosteuden sekä lämpötilan vaikutusta tuloksiin tutkittiin. Lisäksi tutkittiin kahdesta eri viilulaadusta valmistettua kertopuuta.

#### MATERIAALI JA KOEKAPPALEET

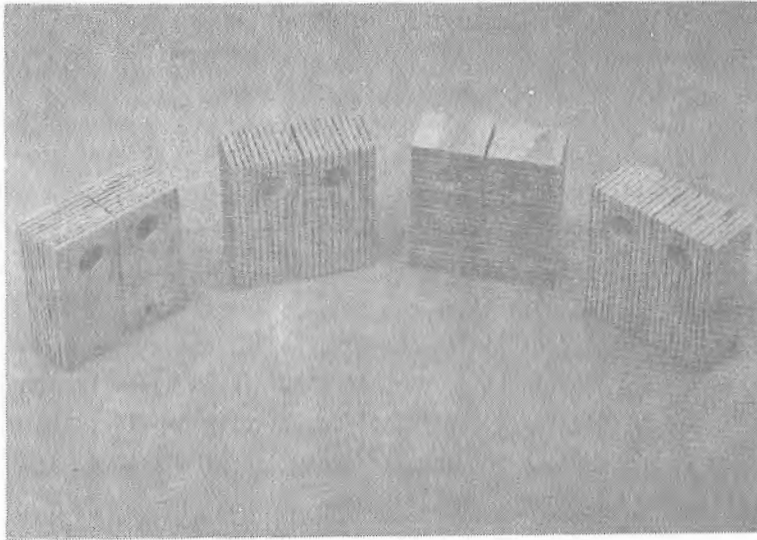
Kertopuumateriaalin toimitti Metsäliiton Teollisuus Oy Lohjalta. Kertopuu on jalostettua puutuotetta jota valmistetaan 3 mm paksuisista sorvatuista kuusiviiluista. Viilut liimataan jatkuvaksi laataksi, jonka paksuus voi vaihdella 27 mm:stä 75 mm:iin. Liimaus suoritetaan siten, että puun syiden suunta on sama kaikissa viilukerroksissa. Laatan leveys on 1,8 m ja pituus rajoittuu valmistustilojen mukaan 24 m:ksi. Näiden mittojen rajoissa voidaan valmistaa mielivaltaisia palkkeja ja laattoja.

Kaikki kertopuukokeet tehtiin standardin mukaisilla CT-koekappaleilla joiden paksuus oli 27 mm. Käytetyt koekappalesarjat ilmenevät taulukosta 1. Taulukossa on annettu se vakioasteuuteen suhteellinen kosteus, missä koekappaleet tasaantuivat ennen kokeiden suoritus.

Taulukko 1. Koesarjat.

Murtumissysteemi	Kosteus	Kpl
TL	80 %	24
RL	80 %	24
TR	80 %	20
RT	80 %	24
TL	70 %	23
TL	50 %	24
TL	50 %	24
TL	80 %	24
TL	80 %	24

- Tämän sarjan koekappaleet on ennen koekuormitusta kuivatettu 3 tuntia uunissa jonka lämpötila oli välillä +35°C ja +40°C.
- Tämän sarjan koekappaleet on ennen koekuormitusta säilytetty 24 tuntia -10°C lämpötilassa.
- Tämä sarja koostuu koekappaleista joita on valmistettu pelkästään pinta-viiluista. Pintaviilut sisältävät vähemmän oksia kuin tavalliset viilut.



Kuva 1. Kertopuiset CT-koekappaleet murtumistapauksissa TL, RL, TR ja RT vasemmalta lukien.

Tapaus ilmoitetaan kahdella kirjaimella, ensimmäinen ilmoittaa halkeaman tason normaalin suunnan ja toinen halkeaman kasvun suunnan.

Ortotropiaa tutkittiin vertaamalla neljää ensimmäistä koesarjaa keskenään. Kosteuden vaikutusta selvitettiin neljän ensimmäisen TL-koesarjan avulla. Lämpötilan ja viilulaadun vaikutusta tutkittiin vertaamalla kahta viimeistä koesarjaa edellisiin TL-sarjoihin.

Halkeamarintaman kasvua tutkittiin ruiskuttamalla väriainetta halkeamaan. Murtumissitkeytulokset analysoitiin tilastollisesti, jolloin tutkittiin aineiston normaalisuutta, vertailtiin eri ryhmien arvoja sekä etsittiin regressioanalyysin avulla mahdollisia riippuvaisuuksia tiheyden, kosteuden ja murtumissitkeyden välillä.

## ESIKOKEET

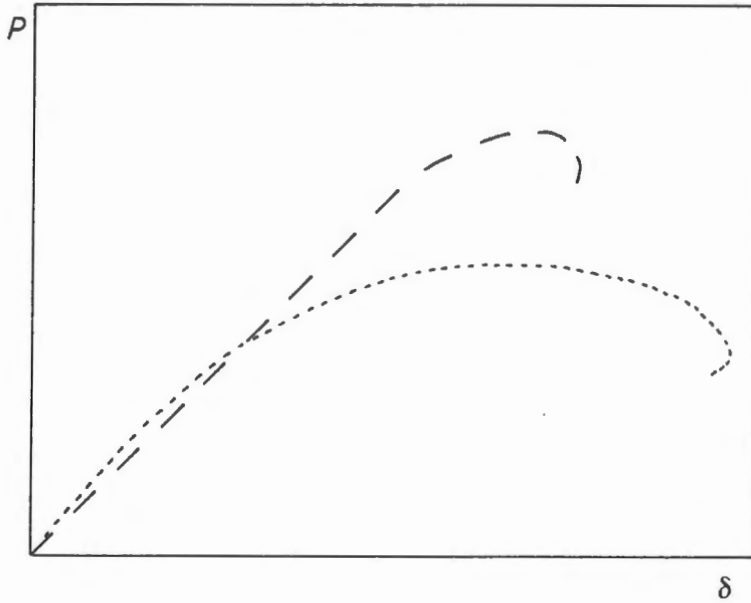
Esikokeissa kuormitettiin 14 TL, 4 RL, 4 TR ja 4 RT koekappaletta. Tarkoituksena oli selvittää miten standardi ASTM E399-81 soveltuisi kertopuulle.

Kertopuun voima-siirtymäkäyrä eroaa männyn ja kuusen vastaavista käyristä. Käyrä on epälineaarinen pienistä voima-arvoista lähtien. Sitä ei voida approksimoida suoralla viivalla kuten männyllä ja kuusella. Tämä epälineaarisuus esiintyy jokaisessa murtumistapauksessa. Koska sekä alkuperäinen kuusimateriaali että liima, fenolihartsit, ovat lineaarisia ja hauraita niin P- $\delta$  käyrän muotoa ei voida selittää alkuperäisen materiaalin avulla. Valmistettaessa viiluja kuusipuutukeista sorvaamalla syntyy sorvihalkeamia. Nämä halkeamat aiheuttavat P- $\delta$  käyrän epälineaarisuuden.

Kertopuumateriaali eroaa männystä ja kuusesta myös suurilla voima-arvoilla. Koekappale on sitkeä eikä altis haurasmurtumaan. Kappale ei murru heti saavutettuaan maksimikuorman vaan siirtymä kasvaa. Tämä pätee selvästi tapauksissa TL ja RL, vähemmän selvästi tapauksessa RT. Vain tapauksessa TR murtuminen tapahtuu hauraasti.

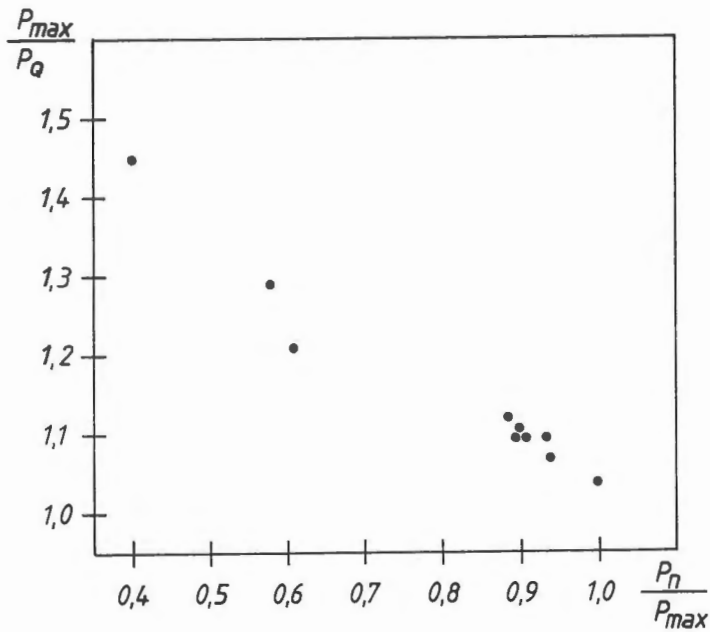
Eri murtumistapauksissa suoritettut kokeet eivät täytä ehtoja yksittäisten koetulosten hyväksymiseksi. Koska voima-siirtymäkäyrä on epälineaarinen tulee  $P_Q$ :n arvo niin pieneksi että suhde  $P_{max}/P_Q$  on suuruusluokkaa 1,50. Tämä ylittää raja-arvon 1,20, joka on asetettu männylle ja kuuselle. Jos samaa raja-arvoa sovelletaan kertopuulle, ei ole tarkoituksenmukaista määrittää murtumissitkeyttä  $K_Q$ . Seurauksena on, että lineaaris-elastinen murtumismekaniikka ei sovellu kertopuulle, vaan tulisi käyttää elastis-plastista murtumismekaniikkaa.

TL-suunnassa tehtiin murtumissitkeyskokeita myös koekappaleilla, joita esikuormitettiin toistuvilla kuormilla. Esikuorma pidettiin joko vakiona tai kasvatettiin tasaisesti jokaisessa kuormitusjaksossa. Paris'in lain mukainen



Kuva 2. Kertopuun P- $\delta$  käyrä eroaa männyn ja kuusen käyristä, toisaalta se on epälineaarinen, toisaalta kapasiteetti ei vähene yhtä nopeasti kuin männyllä ja kuusella.

P- $\delta$  käyrän kulmakerroin TL- ja RL-tapauksessa on 5-6 kertaa niin suuri kuin RT- ja TR-tapausten kulmakerroin. Tätä voidaan selittää ortotropian vaikutuksella.



Kuva 3. Käyttämällä erisuuruisia esikuormituksia  $P_n$  voidaan suoraan vaikuttaa suhteeseen  $P_{max}/P_Q$ . Ei ole esikuormituksen kynnsarvoa, joka yksikäsitteisesti määrittäisi  $P_Q$ :n arvon. Murtumissitkeyttä ei voida hyväksyttävästi määrittää esikuormittamalla koekappaletta.



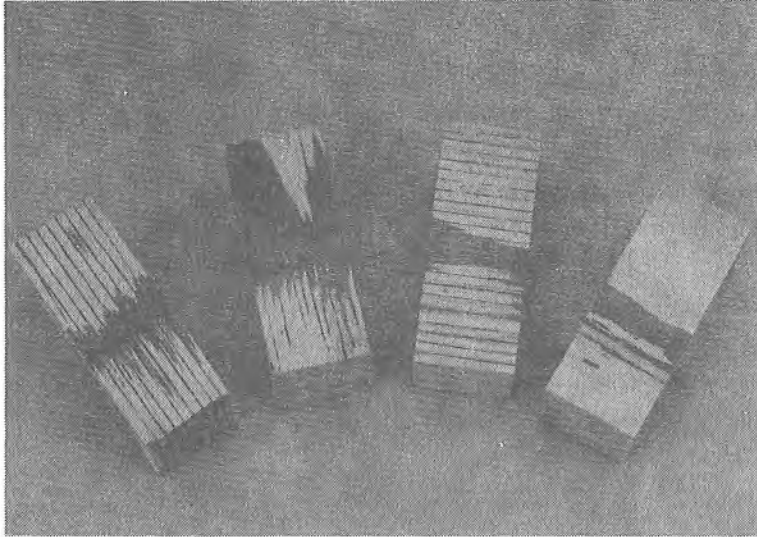
teoreettinen tarkastelu osoittaa, että esikuormitusten kasvaessa ainoastaan viimeinen jakso on merkityksellinen, niin kauan kun edellisten jaksujen lukumäärä ei ole hyvin suuri. Koekappaleiden suurin kuorma laski hiukan verrattuna koekappaleisiin, jotka kuormitettiin suoraan murtoon. Jos oletetaan, että alkuhalkeaman pituus jonkin verran kasvaa esikuormituksessa, niin murtumismitkeyden ei muutu. Sitä vastoin  $P_Q$ :n arvo kasvoi, jolloin suhde  $P_{max}$ :n ja  $P_Q$ :n välillä pieneni. Kun esikuormitus oli 60 %  $P_{max}$ :n arvosta, niin suhde oli 1,20. Vastaavasti suhde 90 % esikuormitukselle oli 1,10.  $P_Q$  kasvaa tasaisesti, kun esikuormitusta nostetaan, joten  $P_Q$  riippuu suoraan edellisen kuormitusjakson kuormituksesta. Tästä syystä murtumismitkeyttä  $K_Q$  ei voida hyväksyttävästi määrittää esikuormittamalla koekappaleita.

Esikokeiden perusteella päätettiin, että murtumismitkeyskokeet kertopuulle tehdään vastaavalla tavalla kuin männyille ja kuuselle eli nostamalla kuormitusta tasaisesti. Kertopuulle lasketaan maksimikuormaa  $P_{max}$  vastaava murtumismitkeyden  $K_{max}$  eikä kriittistä kuormaa  $P_Q$  vastaavaa murtumismitkeyttä  $K_Q$ . Kriittinen J-integraali, joka on elastis-plastisen murtumismekaniikan materiaali parametri, kuvaa mahdollisesti paremmin kertopuuta. Kriittisen J-integraalin määrittämistä puumateriaalille kehitetään parasta aikaa VTT:llä.

#### KOETULOKSET

Kertopuussa halkeamarintaman kasvu on tasasyvä ainoastaan TR-tapauksessa, muissa tapauksissa kasvu on epätasainen. TL- ja RL-tapauksessa kasvu alkaa sahatusta alkuhalkeamasta, kun taas sorvihalkeamat toimivat alkusäröinä TR- ja RT-tapauksessa RL- ja RT-tapauksessa halkeaman kasvu jatkuu viilukerroksen ja liimasauman välissä. RT-tapauksessa kasvu voi vaihtaa liimasaumaa sorvihalkeaman kohdalla. On ilmeistä että halkeama kasvaa helpoimmin liiman ja puumateriaalin välissä. TR-tapauksessa halkeama ei kasva suoraan, vaan se etenee viilujen sorvihalkeamissa. TL-tapauksessa halkeama etenee suoraan. Jos rintama osuu oksaan yksittäisessä viilussa, niin halkeama muuttaa suuntaa ja kiertää oksan tässä viilussa. Näin oksat parantavat kertopuun kykyä vastustaa halkeaman kasvua.

Kertopuun tiheys on normaalijakautunut keskiarvon ollessa  $461 \text{ kg/m}^3$  ja hajonnan  $14 \text{ kg/m}^3$ . Kosteusjakauma eroaa normaalijakaumasta koska koekappaleet säilytettiin eri kosteushuoneissa. Myös murtumismitkeyden jakauma eroaa normaalisesta, koska minkäänlaista erottelua esimerkiksi murtumistapausten välillä ei ole suoritettu.



Kuva 4. Halkaistut kertopuukoekappaleet murtumistapauksissa TL, RL, TR ja RT vasemmalta lukien.

Alkuhalkeama on keskellä ja halkeamarintama on kasvanut alaspäin.

Mustat kohdat RL- ja RT-koekappaleessa ovat liimaa ja osoittavat että koekappale on murtunut liiman ja viilun väliltä.

RL- ja RT-koekappaleiden toiset puolikkaat ovat miltei kokonaan mustat.



TL-koekappaleet valmistettiin 27 mm paksusta kertopuusta ja RL-, RT- sekä TR-koekappaleet 75 mm paksusta kertopuusta. On mahdollista, että materiaalin eroavaisuus heijastuu tuloksissa vertailtaessa eri murtumistapauksia keskenään. Muissa vertailuissa tämä ei häiritse, koska koesarjat koostuvat pelkästään TL-koekappaleista.

Vertailtaessa neljää ensimmäistä koesarjaa todettiin, että kaikki murtumistapaukset erosivat toisistaan tilastollisesti. Koesarjojen keskiarvot ja hajonnat ilmenevät taulukosta 2.

Taulukko 2. Koetulokset eri murtumistapauksissa.

		RL	TL	RT	TR	
K <sub>max</sub>	μ	231	300	129	163	kNm <sup>-3/2</sup>
	σ	59	37	32	25	kNm <sup>-3/2</sup>

Murtumissitkeys TL-suunnassa on suurin, koska halkeama etenee puumateriaalissa. Halkeamalla ei ole mahdollisuutta kasvaa liimasaumassa. RL-tapauksessa halkeama kasvaa liiman ja viilun välillä, mikä pienentää murtumissitkeysarvoa. Liiman heikko tartunta syrjäyttää ydinsäteiden vahvistavan vaikutuksen. RT- ja TR-tapauksessa halkeaman kasvu alkaa sorvihalkeamista mikä selittää pienen murtumissitkeyden.

Vertailtaessa neljää ensimmäistä TL-sarjaa todettiin, että ainoastaan viimeinen sarja, uunissa kuivatetut koekappaleet, erosi tilastollisesti muista sarjoista. Kertopuun kosteus, oli sarjoittain 14,6 %, 12,3 %, 10,9 % ja 9,0 %. Viimeisessä sarjassa kuivuminen on ollut niin nopeata, että jännityksiä ja halkeamia on syntynyt. Koekappaleet eivät ole hitaasti tasaantuneet kosteuteen 9,0 %. Kertopuun kosteus ei ole sama kuin viilujen kosteus, koska kertopuussa liiman osuus on mukana. Kun muut kolme sarjaa yhdistetään, saadaan murtumissitkeyden keskiarvoksi 294 kNm<sup>-3/2</sup>.

Koesarjalle, joka ennen koekuormitusta säilytettiin -10°C lämpötilassa, saatiin murtumissitkeydeksi 296 kNm<sup>-3/2</sup>. Tämä arvo ei eroa tilastollisesti muista TL-tapauksien tuloksista, nopeasti kuivattua koesarjaa lukuunottamatta.

Pintaviiluista valmistettujen koekappaleiden murtumissitkeys oli 242 kNm<sup>-3/2</sup> joka eroaa tilastollisesti arvosta 294 kNm<sup>-3/2</sup>. Tämä selittyy sillä, että pintaviiluissa esiintyy vähemmän oksia kuin muissa viiluissa. Kun halkeaman rintama jossakin viilussa kohtaa oksan, niin halkeaman kasvu tässä

viilussa muuttaa suuntaa ja kiertää oksan. Tämä suunnanmuutos vaati enemmän energiaa, kuin jos halkeama kasvaisi suoraan. Viilun oksat lisäävät kertopuun kapasiteettia halkeaman kasvua vastaan.

Regressioanalyysin avulla yritettiin selittää murtumissitkeyttä tiheyden ja kosteuden avulla. Parhaan regressioyhtälön korrelaatiokerroin oli 0,34. Kosteus ei ollut merkitsevä selittäjä, mitä voitiin odottaa t-testien perusteellakin. Kertopuun murtumissitkeyttä ei voida selittää tiheyden avulla. Tiheyden variaatiokerroin on vain 0,03. Jos tiheyden hajonta yleisesti on näin suppea voidaan päätellä että murtumissitkeyden vaihtelu on satunnainen.

#### KIRJALLISUUSLUETTELO

ASTM E399-81, 1981.

Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials. Am. Soc. for Test. and Mater.

Fonselius, M., 1986.

Brottmekanisk studie på gran och skiktträ. Teknillinen korkeakoulu. Rakennusinsinööriosasto, Rakennetekniikan laitos, Julkaisu 80. 55 s. + liitteet 13 s.

Lei, Y-K., Wilson, J.B., 1979.

Fracture toughness of parallel-laminated veneer. For. Prod. J. 29(8):28-32.

Wright, K., 1986 a.

Männyn ja kuusen murtumissitkeyden määrittäminen CT-koekappaleilla. VTT Tutkimuksia 387. 78 s. + liitteet 19 s.

Wright, K., 1986 b.

Männyn ja kuusen murtumissitkeys säröä avaavassa kuormitustapauksessa. Rak. Mek. 19(2):56-59.

*Mikael Fonselius, dipl.ins., Valtion teknillinen tutkimuskeskus,  
rakennetekniikan laboratorio*