

MURTUMISMEKANIIKAN SOVELTAMINEN SUOMALAISEEN PUUHUN

Kirsti Wright ja
Erkki KM Leppävuori

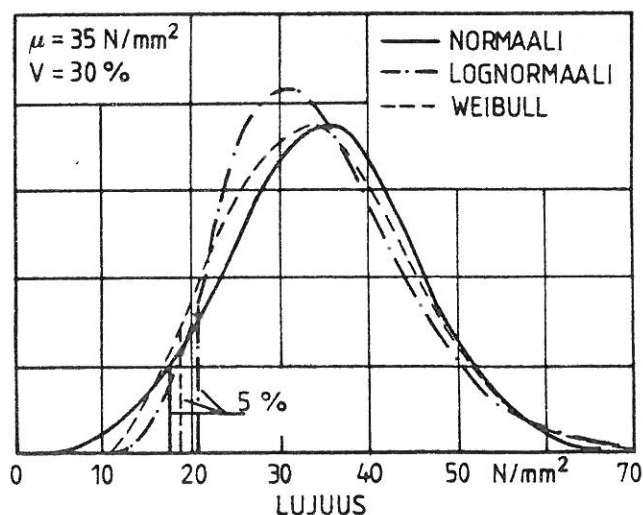
Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 16
No 4 1983, s. 16...32

YHTEENVETO: Rakennesuunnittelussa on 1970-luvulla tapahtunut useita radikaaleja muutoksia, mm. rajatilamitoituksen yleinen käyttöönotto. Varmuustarkasteluissa haurasmurtuma on ollut puurakenteilla ongelmallinen. Käsitys lujuuden riippuvuudesta puun vioista on ollut paremminkin kokemusperäinen kuin yhtälöin kuvattava. Murtumismekaniikka pyrkii vastaamaan kysymyksiin vikojen todellisesta vaikutuksesta rakenteen toimintaan, elinikään ja varmuuteen. Artikkelissa luodaan yleiskatsaus murtumismekaniikan mahdollisesta käytöstä puurakenteen analysointiin sekä esitetään eräitä käytännön sovellutuksia.

PERINTEISET MURTUMISKRITEERIT

Rakennesuunnittelun yhtenä tavoitteena on saada aikaan luotettava ja kestävä rakenne, joka ei murru aiottua pienemmällä kuormalla tai aiottua lyhyemmässä ajassa. Tämä edellyttää paitsi kuormitusten aiheuttamien rasitusten laskemista myös materiaalin kestäkyvyn tuntemista.

Materiaalin kestäkyky määritetään tekemällä tietty määrä lujuuskokeita. Kokei-



Kuva 1. Valitun jakautuman vaikutus ominaislujuuden arvoon. Kaikilla jakautumilla on sama keskiarvo 35 N/mm^2 ja hajonta, variaatiokerroin on 30% .

den tulokset kuvataan tilastollisena jakautumana ja aineen ominaislujuus määritellään tavallisesti lujuutena, joka todennäköisyydellä $0,95$ ylitetään. Yleensä tilastollisissa arvioinneissa käytetään normaalijakautumaa. Puun lujuusjakautuma on kuitenkin useimmiten epäsymmetrinen keskiarvon suhteen, ja luonnollisestikaan lujuus ei voi olla negatiivinen. Eräät tutkijat ehdottavatkin epäsymmetristen jakautumien, esim. Weibull-jakautuman tai logaritmisen normaalijakautuman käyttöä. Koska kysymyksessä joka tapauksessa on jakautuman

äärilaita, on ominaislujuuden arvo erittäin herkkä jakautuman valinnalle ja suoritettujen kokeiden lukumäärälle (kuva 1).

Klassiset lujuusteoriat, kuten Huber - Von Mises - Hencky, Beltrami - Haigh, Coulomb - Guest, Levi - Civita ja Rankine, on kehitetty homogeenisille ja isotrooppisille aineille. Puu ei ole kumpaakaan, vaikka tavanomaisessa suunnittelussa jännitykset lasketaan olettamalla puu isotrooppiseksi. Puulle on sovellettu seuraavia murtoehtoja:

Aksiaalinen jännitystila

Mitoitusehto voidaan yleisesti esittää muodossa

$$\sigma_{\alpha} / f_{\alpha} = 1, \quad (1)$$

missä σ_{α} on pääjännitys suunnassa α puun syiden suuntaan nähden ja f_{α} vastaava lujuus.

Puun lujuus f_{α} ortotropiasuunnista poikkeavassa suunnassa on suomalaisessa puunormissa annettu vain puristukselle

$$f_{\alpha} = f_1 - (f_1 - f_2) \sin^2 \alpha, \quad (2)$$

missä f_1 on lujuus syiden suunnassa ja f_2 on lujuus syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa.

Hankinson on kehittänyt yhtälöä (2) yleisesti hieman parempaan pidetyn lausekkeen

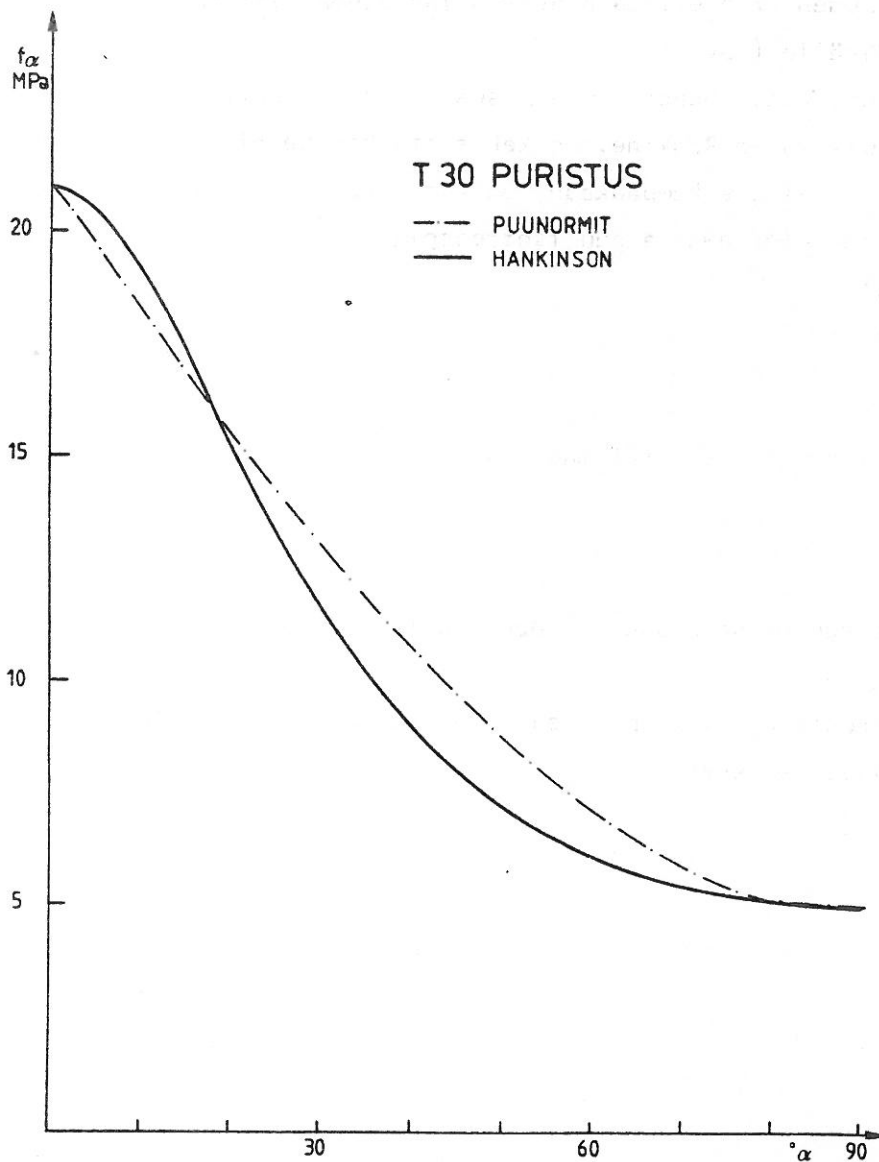
$$f_{\alpha} = \frac{f_1 f_2}{f_1 \sin^2 \alpha + f_2 \cos^2 \alpha}. \quad (3)$$

Kaavaa (3) voidaan soveltaa myös puun vetolujuudelle, toisin kuin kaavaa (2). Kulman α vaikutusta havainnollistaa kuva 2. Eri mallien välillä ei ole ratkaisevaa eroa.

Samassa pisteessä vaikuttavat erilaiset rasitukset otetaan huomioon mitoitus ehdossa esim. summamuodossa

$$\sum \left(\frac{|\sigma_{\alpha i}|}{f_{\alpha i}} \right)^{n_i} = 1. \quad (4)$$

Suomen puunormeissa yhdistetylle taivutukselle ja vedolle sekä taivutukselle ja puristukselle on n_i :n arvo yksi. Puristusrasituksen aiheuttaman puun plasti-



Kuva 2. Puun lujuuden riippuvuus puristussuunnasta.

soitumisen vuoksi olisi oikeampaa valita yhdistetyssä taivutuksessa ja puristuksessa taivutuksen osuudelle suurempi n_1 :n arvo.

Tasojännitystila

Joissakin tapauksissa puurakenne analysoidaan tasojännitystilassa. Hyvänä esimerkkinä on liimapuupalkkien reikien vaikutuksen tutkiminen palkin kantokykyyn. Norris on esittänyt puun murtumiskriteeriksi tasojännitystilassa lausekkeen

$$\left(\frac{\sigma_1}{f_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{f_2}\right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{f_1f_2} + \left(\frac{\sigma_{12}}{f_{12}}\right)^2 = 1 \quad (5)$$

Kaavassa σ_{12} on leikkausjännitys ja f_{12} leikkauslujuus.

Vaikka puun murtuminen on luonteeltaan erilainen puristus- ja vetorasituksen, on kaavaa (5) sovellettu hyvin tuloksin.

Puun veto- ja puristuskäyttäytymisen erilaisuuden huomioonottamiseksi ovat Tsai ja Wu esittäneet murtoehdon

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{66}\sigma_{12}^2 = 1, \quad (6)$$

missä

$$F_1 = \frac{1}{f_{1t}} - \frac{1}{f_{1c}}; \quad F_2 = \frac{1}{f_{2t}} - \frac{1}{f_{2c}};$$

$$F_{11} = \frac{1}{f_{1t}f_{1c}}; \quad F_{22} = \frac{1}{f_{2t}f_{2c}};$$

$$F_{66} = \frac{1}{f_{12}^2}.$$

Usein murtuminen alkaa halkeaman muodostumisella rasituksen ylittäessä lujuuden f_2 puun heikommassa suunnassa. Tätä vastaava mitoitusehto voidaan esittää muodossa

$$\sigma_2/f_2 = 1. \quad (7)$$

Jos halkeama ei pääse vapaasti kasvamaan on kaavan (7) mukaisesti mitoitettulla rakenteella ylikapasiteettia.

Viat

Puuta voidaan ajatella yhdistettynä aineena, jonka komponentit ovat ehjä, virheetön puuainekas ja viat. Yhdistetyn aineen lujuus riippuu komponenttien lujuudesta ja määrästä, ja myös niiden keskinäisestä sijainnista ja suuruussuhteista. Vikojen ei yleensä oleteta ottavan vastaan lainkaan jännityksiä. Tämä pitääkin paikkansa halkeamatyyppeihin vikoihin. Sen sijaan terveet oksat toimivat rakenteessa, joskin toisin kuin perusaine.

Suomen puunormeissa sahatavaran lujuuslajittelua koskevissa ohjeissa sallittu vikakoko annetaan suhteessa sahatavaran kokoon. Mittaus suoritetaan pintaa tarkastelemalla. Näin pyritään siihen, että suuret ja pienet rakenneosat olisivat suhteessa yhtä vahvoja. Kokeellisesti on todettu jo vuosisatoja sitten, että ai-

neen lujuus pienenee tilavuuden kasvaessa. 1930-luvulla Weibull kehitti teorian, jonka mukaan samanmuotoiset kappaleet A ja B murtuvat samalla todennäköisyydellä, kun murtumisen aiheuttavien jännitysten σ_A ja σ_B suhde riippuu tilavuuksien V_A ja V_B suhteesta

$$\frac{\sigma_A}{\sigma_B} = \left(\frac{V_B}{V_A} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (8)$$

missä m on aineesta ja kappaleen muodosta riippuva vakio.

Vaikka vikojen todennäköisyys suurissa ja pienissä koekappaleissa olisi sama, niin suuressa kappaleessa on suurempi mahdollisuus, että suuri vika sijaitsee vaarallisessa paikassa. (Rakennuksen kokonaisuuden kannalta on myös vakavampaa jos pääkannattaja murtuu kuin jos sekundääripalkki murtuu. Tämä muodostaa kokonaan toiselta näkökannalta perusteen alhaisemman ominaislujuuden, ts. suuremman varmuuskertoimen, käyttäytymiselle.)

Muutamien maiden puunormeissa ovat lujuusarvot kappaleen koosta riippuvia. Suomen puunormit ovat omaksuneet USA:n normeista yli 300 mm korkeiden liimapuupalkkien taivutuskapasiteetille redusointikertoimen

$$C_F = \left(\frac{300}{d} \right)^{\frac{1}{9}}, \quad (9)$$

missä d on palkin korkeus (mm).

Useissa muissa maissa esim. Kanadassa ei mitään tällaisia kertoimia käytetä, koska tutkijat katsovat ominaislujuuden (tai sallitun jännityksen) määrittämisen sisältävän myös kokovaikutuksen eräänä hajonnan osatekijänä.

MURTUMISMEKANIIKAN PERUSKÄSITTEITÄ

Metallirakenteiden haurasmurtumatarkasteluissa murtumismekaniikalla on nykyisin keskeinen asema. Murtumismekaniikan soveltaminen metalleihin on jo lähes ruutiininomaista. Sitä vastoin useiden muiden materiaalien kohdalla (muovit, puu) murtumismekaniikan tutkimus on alkuvaiheessa.

Koska murtumismekaniikan perusteita, kehitystä ja sovelluksia on tässäkin lehdessä jo käsitelty /1/, rajoitutaan tässä yhteydessä sovellusten kannalta tärkeimpiin peruskäsitteisiin.

Keskeinen käsite murtumismekaniikassa on särö, joka aiheuttaa ympäristöönsä jännityshuipun. Jännityshuipun suuruutta mitataan jännitysintensiteetillä K_N

$$K_N = \sigma \sqrt{\pi a} H, \quad (10)$$

missä α on keskimääräinen jännitys ilman säröä, a särön suuruusmitta sekä H geometrinen tekijä, jonka arvo riippuu kappaleen kuormituksesta ja muodosta.

Särö voi kasvaa rajallisella nopeudella. Kasvulait ovat yleensä muotoa /1,2/

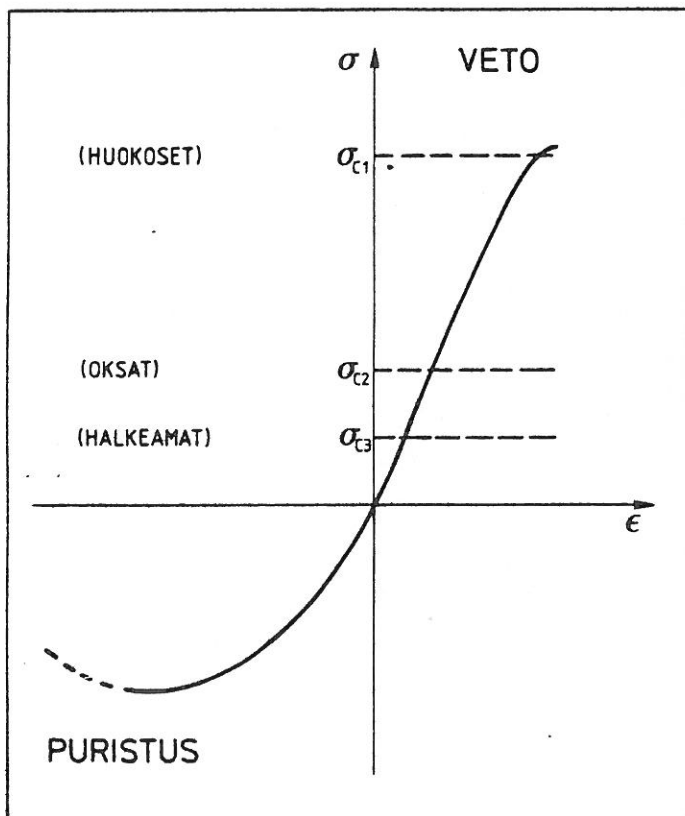
$$\frac{da}{dt} = C \cdot (\Delta K_N)^n, \quad (11)$$

missä C ja n ovat materiaalivakioita.

Tietyllä a :n arvolla K_N saavuttaa murtoisitkeysarvon K_{NC} , jolloin särön etenemisnopeus kasvaa moninkertaiseksi (jopa 40 % äänen nopeudesta) ja tarkastettava kappale murtuu äkillisesti. Murtoisitkeys on materiaalivakio, vaikkakin se on voimakkaasti riippuvainen koejärjestelyistä.

Jos murtoisitkeys K_{NC} ja vikakoko a_0 tunnetaan, voidaan kuormitustapaan ja kappaleen muotoon liittyvä lujuus σ_{c0} ilmaista muodossa

$$\sigma_{c0} = K_{NC} / (\sqrt{\pi a_0} H) \quad (12)$$



Kuva 3. Puun periaatteellinen jännitysvenymäpiirros. Puristusrmurtuma on sitkeä. Vetolujuus riippuu vikojen suuruudesta.

Puun jännitys-venymä piirros on esitetty kuvassa 3. Yleensä puun puristusrmurtuma on sitkeä. Puristusjännityksen kasvaessa tapahtuu eräänlaisia mikronurjahduksia kappaleen silti menettämättä kantokykyään. Muodonmuutos voi kasvaa vielä maksimikuorman saavuttamisen jälkeenkin.

Vetojännityksiä tarkasteltaessa tilanne on toinen. Vetolujuus voi asettua mielivaltaiselle tasolle riippuen erilaisista puuaineissa luonnostaan olevista ja aiheutetuista säröistä. Vetojännitysten vaikuttaessa murtuma tapahtuu hauraasti ilman merkittävää muodonmuutosta.

Virheettömillä koe-kappaleilla suoritetuissa vetokokeissa koe-kappaleen kestävä jännitys σ_{c1}

vastaa tiettyä särökokoja a_1 . Mindess on saanut a_1 :n arvoksi 2-4 mm /3/. Puuainetta ajatellen on siis kysymys vuosirengasvälin suuruusluokkaa olevista säröistä. Särönä voi myös toimia mikä tahansa aineen heikompi kohta, jonka kuormitusosuus siirtyy ympäröivälle lujemmalle materiaalille jännityshuipuksi.

Rakenteisiin käytetty sahatavara sisältää aina oksia ja muita vikoja. Tunnusomaista murtumismekaniikalle on, että vian koko ja sijainti yhdessä määräävät lujuuden. Vaarallisin oksa ei välttämättä ole suurin, jos pienempi oksa on sijainniltaan epäedullisempi, esim. kulmaoksa. Lujuuslajitteluohjeen mukaisesti luokassa T 24 lappeen keskellä sallitaan oksa, jonka koko on kolmannes kappaleen leveydestä, $a_2 = 6-15$ mm. Kaavasta (12) voidaan arvioida vastaavaksi lujuudeksi σ_{c2} noin $0,5 \sigma_{c1}$.

Erityisen vaarallisia ovat suuret halkeamat ja rakenteelliset lovet. Nämä voivat entisestään alentaa koekappaleen kapasiteettia arvoon σ_{c3} . Koska vetolujuus on näin herkkä vioille, ovat puunormeissa annetut sahatavaran ominaisvetolujuudet syiden suunnassa selvästi vastaavia puristuslujuuksia pienempiä, vaikka virheettömän puun vetolujuus on tuntuvasti puristuslujuutta suurempi.

PUUN ORTOTROPIA JA MURTUMINEN

Ortotropiasta johtuen puulla voidaan erottaa kuusi erilaista halkeaman sijainti- ja etenemistapaa. Nämä voidaan käytännössä ryhmittää kahdeksi pääryhmäksi (kuva 4a):

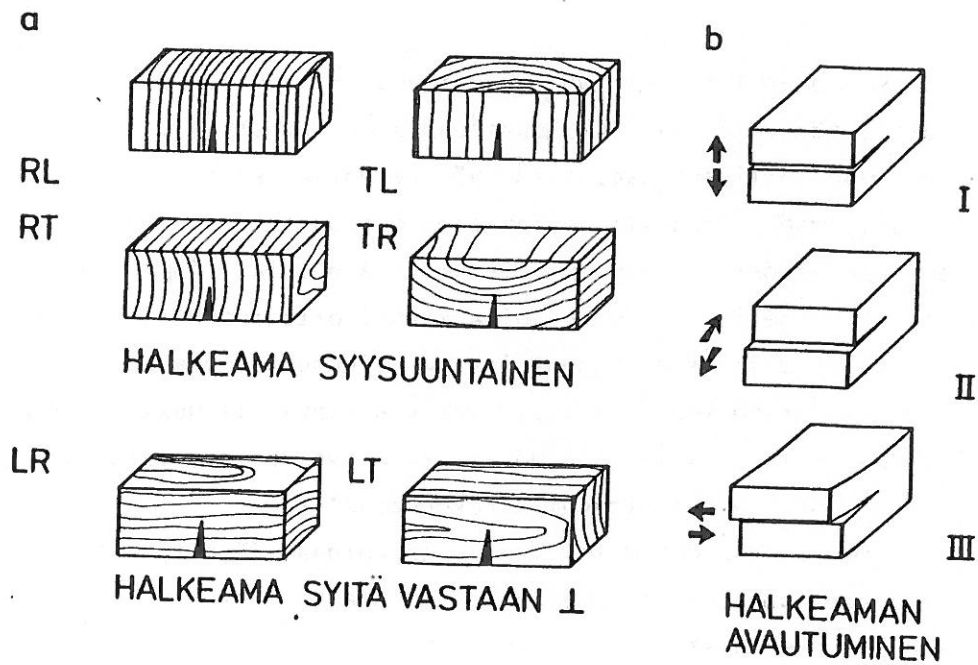
- halkeama on syiden suuntaisessa tasossa (TL TR RL RT -tapaukset) ja
- halkeama on syitä vastaan kohtisuorassa olevassa tasossa (LR JA LT -tapaukset).

Murtumismekaniikassa erotetaan kolme eri murtumistapaa kuormituksen ja halkeaman avautumissuunnan mukaan (kuva 4b):

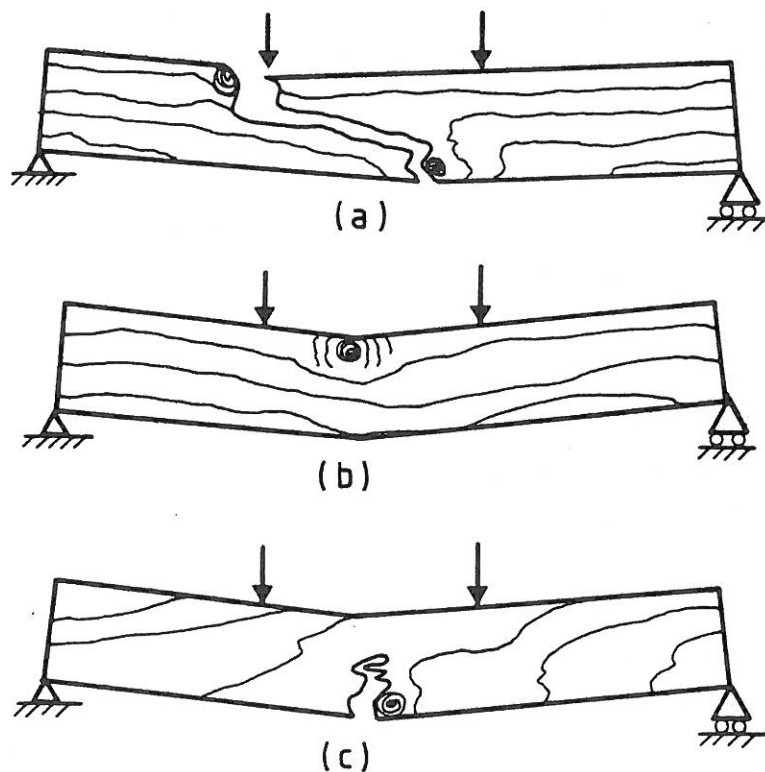
- murtumistapa I esiintyy silloin, kun särön välittömässä ympäristössä olevat jännitykset vaikuttavat kohtisuorassa särön tasoa vastaan,
- murtumistapa II esiintyy silloin, kun särön välittömässä ympäristössä olevat jännitykset vaikuttavat särön tason suuntaisesti avautumissuunnassa ja
- murtumistapa III esiintyy kun särön välittömässä ympäristössä olevat jännitykset vaikuttavat särön tason suuntaisesti avautumissuuntaa vastaan kohtisuorasti.

Pienillä oksattomilla taivutuskoekappaleilla on puristumurtuma tavallisin, mikä on jännitysvenymäpiirroksenkin mukaan ilmeistä. Täysikokoisilla sahatavarpalkeilla puristumurtuma on harvinaisempi. Tutkijoiden käsitykset muiden murtumistapojen merkityksestä eroavat toisistaan (kuva 5).

Tärkein murtumistapa on Madsenin /4/ mukaan TL, TR, RL tai RT -tasossa tapahtuva tavan I mukainen särön avautumismurtuma. Kun puurakenteissa yleensä välte-



Kuva 4. Puun murtumistavat. a) Puuaineen kannalta. b) Murtumismekaniikan kannalta.



Kuva 5. Oksien aiheuttamia murtumistapoja sahatavarassa. a) Vino vetojännitys vinosyisyysalueessa. b) Puristumurtuma. c) Paikallisen vinosyisyyden aiheuttama lovi.

tään syiden suuntaan nähden poikittaisia vetojännityksiä, voi tällainen murtuma alkaa vain oksakohtaan liittyvästä vinosyisyysalueesta.

Koska valtaosassa puurakenteita vetojännitykset ovat syiden suuntaisia, Schniewind /5, 6/ pitää tärkeänä LR ja LT suuntien ja murtumistapa I:n tutkimista. Tilanteen tekee ongelmalliseksi se, että myös keinotekoisesta lovesta alka- va halkeama pyrkii kääntymään luonnollisempaan etenemissuuntaan.

Barrett ja Foschi /7/ korostavat tavan II merkitystä puulla. Tapa I on tyy- pillinen isotrooppisille aineille. Puu on voimakkaasti ortotrooppinen, ja suu- rimmat leikkausjännitykset sijaitsevat luontaisessa heikkoussuunnassa. Varsinkin palkkien tukialueilla olevat halkeamat tulisi tarkistaa tavan II mukaista murtu- maa vastaan. Myös tapojen I ja II yhdistelmät tulevat kysymykseen, varsinkin jos kuormitukset tulevat vinosti tarkasteltavalle rakenneosalle.

Kun tavanomaisessa puurakenteiden mitoittamisessa voidaan jännitykset laskea olettaen puun olevan isotrooppista, on epävarmaa, voidaanko murtumistarkasteluis- sa tyytyä tällaiseen yksinkertaistukseen. Tämä johtaa yleensä numeeristen mene- telmien käyttöön. Elementtimenetelmää käyttäen voidaan puun ortotrooppisuus ot- taä helposti huomioon. Taulukkokirjoissa esiintyvät jännitysintensiteettiärvot on yleensä laskettu isotrooppiselle aineelle, joten niiden käyttö vaatii harkintaa.

VISKOELASTISUUS JA ELINIKÄ

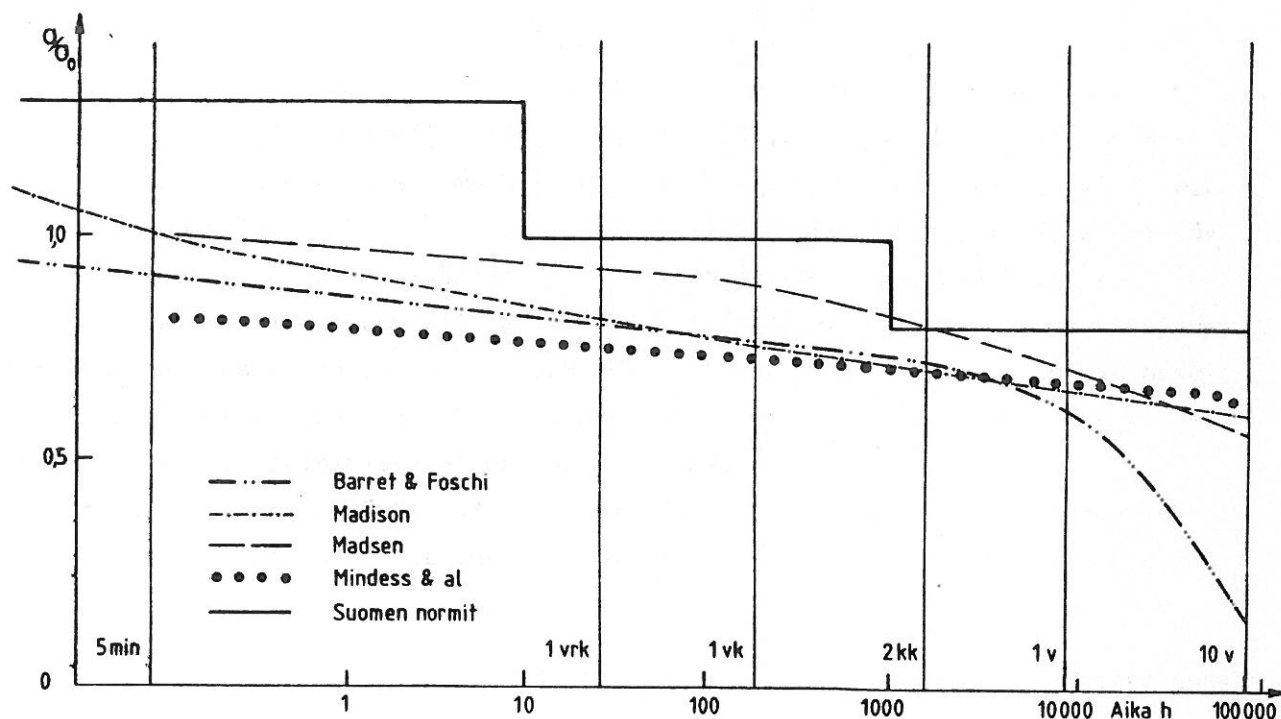
Puu on paitsi ortotrooppista, myös viskoelastista ainetta. Kuormituksen kesto vaikuttaa puun lujuuteen ja muodonmuutokseen. Eri tutkijoiden näkemyksiä kuormi- tusaika -lujuus riippuvaisuudesta on koottu kuvaan 6.

Suuri osa käytössä olevista suunnitteluohjeista johtanee pitkäaikaisten kuor- mien vaikutuksen arvioinnin ns. Madison-käyrästä, jonka Wood laati pienten taivu- tuskoekappaleiden perusteella. Koska hän käytti kokeissaan oksatonta puuta, ei tulosten soveltaminen sahatavaraan ole itsestäänselvää. Malliin ei myöskään lii- ty mitään erityistä fysikaalista perustaa /4/.

Uudemmissa tutkimuksissa murtumismekaniikkaa on sovellettu pitkäaikaislujuuden arvioimiseen. Keskeinen tehtävä on määrittää särön kasvulaki, jonka avulla jänni- tysintensiteetin kasvaminen kriittiseksi voidaan ennustaa.

Mindess /3/ on suoraan soveltanut esim. väsymisestä tuttua särönkasvulakia (11). Hän on tutkinut hitaan särönkasvun alueella jännitysintensiteetin vaikutus- ta särönkasvun nopeuteen ja määrittänyt kaavassa (11) esiintyvät vakiot C ja n.

Madsen /4/ esittää viskoelastisuusteoriaan perustuvan särön kasvumallin. Välittömästi kuormitusta seuraa avautumisvaihe, jolloin särön suuruus a ei muutu. Tietyn kynnyksajan jälkeen särö alkaa kasvaa ja avautuminen pysähtyy. Tämä vaihe vastaa tertiaarista virumista. Kriittisen koon saavuttanut särö aiheuttaa kappa- leen murtumisen.



Kuva 6. Murtumisajan riippuvaisuus jännityksen σ suhteesta lujuteen σ_0 . Eri tutkijoiden käsityksiä sekä suomalaisten normien aikaluokkakerroin kosteusluokissa 1 ja 2.

Schniewind puolestaan tarkastelee murtositkeyden riippuvuutta kuormitusajasta /5, 6/. Määrällisesti hänen havaitsemansa kuormitus-elinikä riippuvuus on samaa suuruusluokkaa kuin Madison-käyrän esittämä. Vaikka hän on käyttänyt lovetuja koekappaleita (joiden särökoko on siis mahdollisimman määrätty) on hajonta varsin suuri. Epäselväksi jää, onko K_{IC} jollakin systemaattisella tavalla kuormituksen kestosta riippuva, vai voitaisiinko se käsittää ajasta riippumattomaksi materiaalivakioksi.

Vielä erityyppistä suuntausta edustavat vaurioajatteluun perustuvat elinikä-tarkastelut /8, 9/. Näissä ei tarkastella lainkaan yksittäisen halkeaman kasvua, vaan eräänlaista kollektiivista abstraktia vauriota, joka pelkistyy lukuarvoksi. Murtumismekaniikka on lähinnä analogiana mukana – kun vaurio saa arvon 1, kappale murtuu. Vaurion kasvulakien selvittäminen vaikuttaa monimutkaiselta, koska vaurion toteaminen aineen rakenteessa tapahtuneina muutoksina on lähes mahdotonta. Kasvulain muoto riippuu yleisesti aineesta, lämpötilasta, kosteudesta ja muista fysikaalisista olosuhteista. Vaurioajattelu tarjoaa myös mahdollisuuden jäännöslujuuden ja jäännöseliniän välisten suhteiden tarkasteluun ja muuttuvien kuormitusolosuhteiden huomioonottamiseen.

Kuvasta 6 käy ilmi, että eri tutkijoiden käsitykset ovat verrattain yhtenäisiä tarkasteltaessa lujutta 1 v ikään asti. Huomattavaa on, että Madsen esittää

varsin vähäistä suhteellisen lujuuden alenemista alhaiselle lujuusluokalle lyhytaikaisessa 1 vk - 2 kk kuormituksessa. Barrettin ja Foschin malliin kuuluu jännityskynnys (kuvassa $\sigma/\sigma_0 = 0,10$) jota pienemmällä jännityksellä kestoikä on rajaton. Kynnys saavutetaan sen suuruudesta riippumatta varsin pian 10 v kuluttua. Myös muita jännityskynnyksen arvoja on esitetty, esim. 50 %, jolloin rakenneosien kuormitus käytännössä aina olisi pienempi, ja pitkäaikaiskuormituksella ei olisi vauriota kasvattavaa vaikutusta. 1 v - 10 v välillä vauriomalli antaa varovaisimman arvion rakenteen lujuudesta. Myös Madsenin tulosten mukaan 10 vuoden jälkeen lujuus pienenee voimakkaammin kuin Madison-käyrän mukaan arvioituna.

Tärkeä tekijä särön kasvutapahtumassa ovat kosteusvaihtelut, jotka voivat joututtaa koekappaleen tuhoutumista merkittävästi /5/. Myös suomalaisissa normeissa tämä on otettu huomioon aikaluokkakertoimen riippuvuutena kosteusluokasta.

PUUN MURTOSITKEYDEN RIIPPUVUUS ERI TEKIJÖISTÄ

Puu aineena sisältää luonnostaan laajat mahdollisuudet vaihtelulle - puulaji, kasvupaikka, kasvutapa, metsänhoidolliset tekijät, perinnöllisyystekijät, ilmastollinen vaihtelu kasvuaikana. Osaa näistä voitaisiin säädellä, mutta säätelyn vaikutusten tutkiminen ulottuisi jopa satojen vuosien aikavälille. Luontaisen vaihtelun lisäksi tulee korjuutavasta ja -vuodenajasta, kuivausolosuhteista sekä sahauskäytännöstä aiheutuva vaihtelu. Murtumismekaniikan kannalta edellä mainitut tekijät vaikuttavat säröjen syntymiseen ja murtositkeyteen. Solurakenne ja oksaisuus ovat lähinnä luonnon säätlemiä ominaisuuksia. Tosin lannoituksella ja oksien karsimisella voidaan näihin vaikuttaa. Halkeamista suurin osa muodostuu puun kuivussa, ja halkeamistaipumusta voidaan pienentää valitsemalla kuivumisolosuhteet sopivasti.

Hyvin karkeasti yksinkertaistettuna murtositkeys riippuu kahdesta päätekijästä - tiheydestä ja kosteuspitoisuudesta /10/. Tiheys kuvastaa solurakenteen tiivyyttä ja samalla solurakenteesta johtuvien säröjen kokoa. Suuri tiheys merkitsee pientä särökokoa ja suurta murtositkeyttä. Kosteuspitoisuuden kasvaessa murtositkeys kuten muutkin lujuusominaisuudet huononevat, koska kasvava kosteusmäärä puussa helpottaa kuitujen liikkumista toisiinsa nähden ja edistää särön kasvua.

Kuten metalleilla, myös puulla murtositkeys riippuu koekappaleen koosta. Valmistusmenetelmien tasaisuuden vuoksi metalleilla on lähinnä kysymys tasomuodonmuutostilan tai tasojännitystilän esiintymisestä. Puun yhteydessä merkittävämpi on vikojen tilastollinen vaikutus. Suuren vian esiintymismahdollisuus pienessä kappaleessa on pienempi. Barrett /11/ on todennut eräänlaisen Weibull-tyyppisen heikon rengas-mekanismien olevan puulle tunnusomaisen, ts. K_{IC} -arvojen riippuvuus

koekappaleen koosta on eksponentiaalinen (log-log esityksenä lineaarinen) (yhtälöt (8) ja (9)). Tästä syystä mm. suurien palkkien taivutuskapasiteetti on suhteessa pienempi kuin pienien.

Barrett /2/ on esittänyt taulukoituna K_{NC} -koetuloksia eri halkeamatavoille ja puulajeille. Taulukkoa on täydennetty tiheyden, taivutuslujuuden ja kimmokertoimen osalta (taulukko 1).

Petterson /10/ esittää useiden puulajien murtositkeyden (tapa I TL) riippuvuuden ominaispainosta ja kosteuspitoisuudesta. Murtositkeyttä on myös verrattu vetomurtolujuuteen ja jonkinlainen korrelaatio onkin olemassa. Ominaisuuksien erilaisesta luonteesta johtuen ei kuitenkaan voida muodostaa mitään tarkkaa yhtälöä, joka suoraan muuntaisi esim. taivutuslujuuden (MOR) murtositkeysarvoksi.

Taulukon 1 antamaa taustaa vasten tuntuu hämmästyttävältä Madsenin /4/ esittämä ajatus, että Douglas-Fir puulajilla saatuja tuloksia käyttämällä laskettua kuormitusaike-elinikä riippuvuutta voitaisiin soveltaa kaikille puulajeille. Oletushan olisi tosin sama kuin Madison-käyrän hyväksikäytössä.

Eri tasoille TL, RL, TR, RT ja LR, LT saadut erilaiset arvot selittyvät puun rakenteesta /6/. K_{NC} -arvojen keskinäisiä suhteita ei voitane parin lajin perusteella kovinkaan tarkasti ennustaa. K_{IIC} -arvot vaikuttavat suuremmilta kuin K_{IC} -arvot. Tämä saattaa viitata siihen, että tapa I kuitenkin olisi ensisijainen murtumistapa. Vinosyisyysalueella, missä tapojen I ja II yhdistelmä tulee kysymykseen, vaikuttaa suuri K_{IIC} edullisesti.

Tapojen I ja II yhteisvaikutusta tutkittaessa on löydetty seuraava murtoehto /12/.

$$\frac{K_I}{K_{IC}} + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIC}}\right)^2 = 1 . \quad (13)$$

Tavallisissa sovelluksissa jälkimmäinen termi on pieni, koska K_{IIC} on suuri.

KÄYTÄNNÖN SOVELTAMINEN

Rajatilatarkastelujen yleistyttyä ja tultua mukaan mm. suomalaiseen puurakenteiden suunnitteluohjeeseen, on käsite rakenteen varmuus saanut aivan uuden sisällön. Murtumismekaniikan tutkimustarve esim. Kanadassa on noussut juuri normiuidistuksen pohjalta /2, 4/. Kanadassa ollaan vasta lähitulevaisuudessa siirtymässä rajatilamitoitukseen puurakenteiden suunnittelussa. Australiassa on murtumismekaniikatarkastelut sisällytetty suunnitteluohjeeseen jo varhaisessa vaiheessa /2, 11/.

Taulukko 1. Murtositkeyskoetuloksia eri puulajeille (kosteuspitoisuus ~12 %, lämpötila 21°C).

Puulaji		1) K_{IC} kNm ^{-3/2}	1) K_{IIC} kNm ^{-3/2}	2) Tiheys kgm ⁻³	2) MOR-taivutuslujuus M Pa	2) Kimmo- kerroin G Pa
Douglas Fir	LR	2692		480	85,0	13,4
	LT	2417				
	TR	355				
	RT	355				
	RL	410				
	TL	309	2143			
Ambilis Fir	TL		1626			
White Spruce	TL		1890	400	68,0	9,2
Lodgepole Pine	TL		2187	410	65,0	9,2
Balsa	TL	112	159	170	19,3	3,8
West.Red Cedar	TL	185		320	51,7	7,7
West.White Pine	TL	190		380	67,0	10,1
Douglas Fir	TL	309	2143	480	85,0	13,4
Red Oak	TL	407		590	75,0	10,3
Eastern Red Spruce ⁴	TL	420	2180	380	40,0	8,2
Lauan	TL	478		440	77,9	11,5
Sugar						
Hard Maple	TL	492		630	109,0	12,6
Hoop Pine ³	TL	494				
Messymate						
Stringybark ³	TL	505				
Paper Birch	TL	564		550	25,0	11,0
Maiden's Gum ³	TL	681				

1) Barrettin /2/ mukaan. 2) Usda Wood Handbook'n mukaan. Koska tiedot ovat eri lähteestä, ne eivät välttämättä kuvaa juusi Barrettin tarkoittaman koetilanteen puulajia vaan ovat suuntaa-antavia. Ominaislujuus on noin 2/3 MOR-lujuudesta. 3) Australialaisia puulajeja. 4) Lähteestä /12/.

Suomen oloissa ei liene aiheellista tutkia liimapuupalkkien lamellien jatkoksia, koska yleisesti käytetään sormijatkosta. Sen sijaan lamellien väliset halkeamat (esim. tuilla) ja lamelleissa olevien oksien vaikutus voidaan analysoida murtumismekaniikan avulla. Liimapuupalkkien reikien vaikutuksen analysoinnissa murtumismekaniikka tarjoaa mielenkiintoisen vaihtoehtoisen näkökohdan nykyiselle käytännölle.

Viistetyissä harjapalkeissa syntyvät poikittaiset vetojännitykset ja mahdolliset halkeamat ovat ajateltavissa olevia sovellutuskohteita. Erikoisuutena mainittakoon, että ilmeisesti tutkimuksen korkeammasta tasosta johtuen käytettiin Kanadassa eräässä vaiheessa yli nelinkertaista sallittua poikittaisen vetolujuuden arvoa Yhdysvaltoihin verrattuna.

Oksien vaikutus on paljon monimutkaisempaa kuin vain toimivaa pinta-alaa pienentävinä. Varsinkin vinosyisyysvyöhyke voi olla lopullisen murtuman lähtökohta. Oksien ympärillä esiintyy yleisesti lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksiltaan poikkeavaapuuta, mikä helposti johtaa jännityshuippujen syntymiseen. Näihin ongelmiin on kirjallisuudessa kiinnitetty lähinnä kvalitaviivista huomiota /4/.

Suomalainen kertopuu ja sen yhdysvaltalainen esikuva micro-lam ovat eräs yritys puun laadunvaihtelun tasoittamiseen. Puuaineessa olevat viat jakautuvat tasaisemmin koko rakenneosaan, kun se kootaan päällekkäin liimattavista viiluista. Samalla voidaan ortotropiasuuntien välisiä suhteita muuntaa halutulla tavalla. Murtumismekaniikan kannalta mielenkiintoista on K_{IC} ja K_{IIC} -arvojen mahdollisen muuntelun lisäksi oksien muodostamien heikkousvyöhykkeiden käyttäytyminen samaan suuntaan ja eri suuntiin ladotuissa viiluissa.

Leikkauskapasiteetti on puurakenteita suunniteltaessa harvoin rajoittava tekijä. Tästä syytä voitaisiin palkkien tuilla sallia suuriakin halkeamia rakenteen kantokyvyn merkittävästi huonontumatta /2, 7/. Murtoa vastaava leikkausvoima V tasaisesti kuormitetulle palkille saadaan yhtälöstä.

$$V = C_{II} K_{IIC} \frac{b\sqrt{d}}{1 + 2a/d} \quad (14)$$

missä a on halkeaman pituus, d ja b palkin korkeus ja leveys. C_{II} on vakio, joka riippuu K_{IIC} :n määrittämiseen käytetyn koekappaleen mitoista.

Palkkien loveaminen aiheuttaa yleensä tuntuvia lisärasituksia. Tästä syystä lovettuja palkkeja on kartettu. Murtumismekaniikkaa soveltamalla voidaan rationaalisemmin arvioida loveuksen vaikutusta /2/. Murtoehto voidaan esittää nimellisjännitysten avulla

$$0.3\sigma + 0.7\tau = C_a f_v \quad (15)$$

kun $\sigma = 6M/(bd_{\min}^2)$; $\tau = 1.5 V/(bd_{\min})$, M on poikkileikkauksessa vaikuttava taivutusmomentti, f_v on leikkauslujuus, a loveuksen pituus sekä d_{\min} palkin pienin korkeus. C_a on loveuksen mittasuhteista riippuva kerroin (australialaisista normeista).

$a/(d-d_{\min})$	$d-d_{\min} \geq 0.1 d$	$d-d_{\min} < 0.1 d$
0	$3/d^{1/2}$	$1/(d-d_{\min})^{1/2}$
2	$2.6/d^{1/3}$	$1.2/(d-d_{\min})^{1/3}$
4	$2.2/d^{1/4}$	$1.3/(d-d_{\min})^{1/4}$

Varsinkin pitkäaikaiskuormituksen osalta puurakenteiden varmuus on epämääräinen /4, 9/. Voimakkaasti on kritisoitu paitsi kuormien suuruutta ja arvioitua kestoaikaa, myös käsitystä puuaineen suhtautumisesta aiheutettuun rasitustilaan. Mikäli puutavaraa käytetään uudestaan, olisi voitava selvittää aikaisemman kuormituksen vaikutus jäljellä olevaan lujuuteen ja elinikään. Näiden välisiä suhteita voidaan tarkastella vaurioajattelun avulla.

Selvä varjopuoli murtumismekaniikan käyttöönotossa on suunnittelijan työmäärän kasvaminen. Puurakentaminen tarkoittaa meillä liian usein väliaikaisia telinerakenteita tai pienimuotoisia omakotitaloja. Osittain myös konservatiiviset palomääräyksemme ovat estäneet puun käytön haasteellisissa kohteissa. Mikäli puurakentamisessa halutaan ottaa käyttöön uusia menetelmiä, on niiden oltava riittävän yksinkertaisia saavutettuihin teknillisiin ja taloudellisiin etuihin nähden. Tämä kynnys lienee korkeammalla kuin metallirakentamisessa, missä tuotekehittely ja tutkimus perinteisesti ovat arvostetummat kuin sahateollisuudessa.

Jos murtumismekaniikkaan perustuva rakenneanalyysi yleistyy niissä maissa, joihin vientimme suuntautuu, pitää meidän omista suunnitteluperusteistamme riippumatta tietää sahatavaramme murtositkeysarvot.

KEHITYSNÄKYMÄ

Murtumismekaniikan kaavasto voitaneen esittää suunnittelijalle yksinkertaistettuna muodossa, niin että käytännön soveltamisen esteeksi ei tule vaatimus syvästä teoreettisesta perehtymisestä menetelmään.

Puun ortotropian vaikutus jännitysintensiteetin arvoihin on selvitettävä. Tietyin edellytyksin voidaan käyttää myös isotrooppisille aineille johdettuja jännitysintensiteetin lausekkeita. Hitaan särönkasvun mekanismien tutkiminen auttaa myös selvittämään, onko yleisesti käytetty lineaarinen murtumismekaniikka puulle soveltuva.

Ajatusmallina särö ja särön kasvu tarjoavat hyväksyttävän selityksen muuten oudoille suunnitteluperusteille. Vauriotapausten johdosta hätätoimenpiteenä alennettuja sallittuja jännityksiä on voitu nostaa tutkimuksen hyödyntämisen seurauksena. Suunnitteluohjeessa on mahdollisesti edelleenkin liian ankaria rajoituksia joita voitaisiin lieventää, kun eri tapaukset yksiköidään ja käsitellään perusteellisemmin.

Erityisesti puun eliniän riippuvuus kuorman kestosta on intensiivisen tutkimuksen kohteena. On todettu, että nykyisen suunnittelukäytännön mukaan mitoitettun rakenteen todellinen varmuus merkittävästi poikkeaa suunnittelijan toivomasta. Varmuus saattaa joskus olla jopa alle yksi, ts. rakenne voi hyvinkin vaurioitua elinaikanaan.

Murtumismekaniikan välittömän käytön estää kotimaisten puulajien murtositkeysarvojen puuttuminen. Pohjois-Amerikassa käytettävien puulajien K_{ICTL} vaihtelee välillä 200 - 500 $\text{KNm}^{-3/2}$ ja K_{IICTL} välillä 1600 - 2200 $\text{kNm}^{-3/2}$. Tiheyden perusteella arvioituna meikäläinen sahatavara sijoittunee asteikon yläpäähän, ominaisuuden perusteella taas asteikon alapäähän.

Kotimaisella tutkimuksella on kiire kuroa umpeen muiden puumaiden saavuttamaa etumatkaa.

KIRJALLISUUTTA

- [1] Kärnä, T., Murtumismekaniikan perusteita. Rakenteiden mekaniikka 10 (1977) 4, s. 43-55.
- [2] Barrett, J.D., Fracture mechanics and the design of wood structures. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 299 (1981), s. 217-226.
- [3] Mindess, S., Nadeau, J.S., Barrett, J.D., Slow crack growth in Douglas-fir. Wood Sci. 8 (1975) 1, s. 389 - 396.
- [4] Johns, K., Madsen, B., Duration of load effects in lumber. Parts I-III. Can. J. Civ. Eng. 9 (1982), s. 502-536.
- [5] Schniewind, A.P., Fracture toughness and duration of load factor. II. Duration factor for cracks propagating perpendicular-to-grain. Wood and Fiber 9 (1977) 3, s. 216-226.
- [6] Schniewind, A.P., Centeno, J.C., Fracture toughness and duration of load factor. I. Six principal systems of crack propagation and the duration factor for cracks propagating parallel to grain. Wood and Fiber 5 (1973) 2, s. 152-159.
- [7] Barrett, J.D., Foschi, R.O., Mode II stress intensity factors for cracked wood beams. Eng. Fract. Mech. 9 (1977), s. 371-378.
- [8] Gerhards, C.C., Time related effects of loading on wood strength: A linear cumulative damage theory. Wood Sci. 11 (1979) 3, s. 139-144.

- [9] Barrett, J.D., Foschi, R.O., Duration of load and probability of failure in wood. Part I. Modelling creep rupture. Can. J. Civ. Eng. 5 (1978), s. 505-514.
- [10] Petterson, R.W., et al., Prediction of mode I TL fracture toughness for conifers. Structural research report No. 39. Civ. Eng. Dept. Colorado State University, Fort Collins, Colo 80523, Sept. 1981.
- [11] Barrett, J.D., Effect of crack-front width on fracture toughness of Douglas-fir. Eng. Fract. Mech. 8 (1976), s. 711-717.
- [12] Mall, S., Murphy, J.F., Shottafer, J.E., Criterion for the mixed mode fracture in wood. To be published.

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

Erkki KM Leppävuori, tekn.lis., Teknologian kehittämiskeskus