

MÄNNYN OKSIEN MURTOLUJUUS

SEPPO KELLOMÄKI

Summary

STRENGTH OF SCOTS PINE BRANCHES

Saapunut toimitukselle 16. 6. 1983

Empiiriset mittaukset osoittivat, että männyn kuolleen oksan murtamiseen tarvittava voima oli suoraan verrannollinen oksan läpimitan toiseen potenssiin ja oksan puuaineen tiheyden kolmanteen potenssiin. Samat tekijät vaikuttivat myös elävien oksien murtolujuuteen, vaikkakin oksan puuaineen tiheyden merkitys oli tässä tapauksessa suurempi kuin kuolleissa oksissa. Saatujen tulosten merkitystä puun karsiutumisessa on pohdittu.

JOHDANTO

Oksaisuus on tärkein mäntytykkien laatuun vaikuttava tekijä. Oksaisuudella tarkoitetaan tällöin oksien määrää (lukumäärää, tilavuutta jne.) rungon määräyksikköä (pituus, tilavuus jne.) kohti (Kellomäki ja Tuimala 1981). Oksaisuus riippuu oksien syntymisestä, kasvusta, kuolemista ja karsiutumisesta. Näistä tekijöistä oksien syntyminen on lähes riippumaton ympäristöstä, esimerkiksi puuston tiheydestä (Kellomäki ja Tuimala 1981, Jokinen ja Kellomäki 1982). Muihin tekijöihin puuston tiheys sen sijaan vaikuttaa, sillä oksien kasvu hidastuu ja kuoleminen nopeutuu puuston tiheyden kasvaessa. Oksien karsiutuminen puolestaan näyttää olevan nopeampaa harvoissa kuin tiheissä puustoissa, vaikka kuolleet oksat harvoissa puustoissa ovat aina paksumpia kuin tiheissä puustoissa (Heikinheimo 1953, Kellomäki ja Tuimala 1981, Kellomäki ja Jokinen 1982).

Oksien karsiutumisenopeuden voidaan olettaa riippuvan kuolleiden oksien lujuusominaisuuksista ja oksiin kohdistuvasta mekaani-

sista rasitteista (Heikinheimo 1953). Tässä työssä karsiutumisen oletetaan riippuvan oksan poikkileikkauspinta-alan suuruudesta ja oksan lahoamisasteesta, joiden vaikutusta oksan murtamiseen tarvittavan voiman suuruuteen tutkitaan. Tarkastelussa otetaan huomioon myös oksan korkeuden maanpinnan tasosta ja ilman lämpötilan (oksan jäätymisen) vaikutus oksan murtolujuuteen. Kuolleiden oksien lisäksi tutkitaan vertailun vuoksi myös elävien oksien murtolujuutta.

Tutkimus kuuluu osana Metsäntutkimuslaitoksen metsäteknologian tutkimusosastolle tehtävään tutkimukseen metsänrakenteen ja ympäristötekijöiden vaikutuksesta puuaineen laatuun. Tutkimusaineiston keruun ovat tehneet Veikko Salo ja Pertti Laakso. Aineiston analyysissä on avustanut Esko Valtonen. Kuvien puhtaaksi piirustuksen teki Tiina Pitkänen. Käsikirjoituksen kirjoitti puhtaaksi Anita Vatanen. Käsikirjoituksen luki Matti Kärkkäinen, joka teki monia varteenotettuja korjausehdotuksia.

Esitän kaikille työssä avustaneille ja työtä tukeneille parhaimmat kiitokseni.

Koepuut

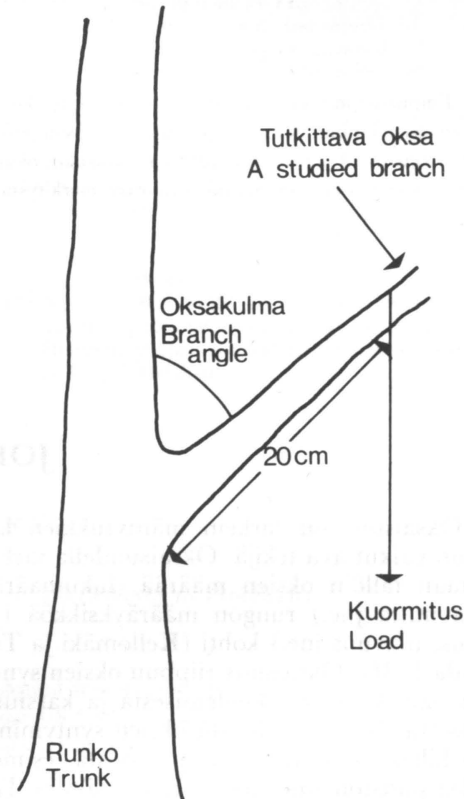
Tutkimuksen empiirinen aineisto kerättiin kevättalvella 1981 Helsingin yliopiston metsäseman läheisyydessä sijaitsevasta nuorestamänniköstä, jonka tiheys oli 6100 runkoa hehtaarilla ja keskipituus 8,5 m. Männikkö oli kylvetty 1955, joten se oli tutkimushetkellä 26 vuotta vanha. Kasvupaikka luokiteltiin hyväksi puolukkatyyppin kankaaksi, joka maaperältään oli hiekkaa.

Tutkimusta varten valittiin metsiköstä 10 koepuuta, jotka edustivat sekä vallitsevia että vallittuja puita. Tarkoituksena oli sisällyttää aineistoon eläviä ja kuolleita oksia, joiden läpimittavaihtelu olisi mahdollisimman suuri. Tutkimusaineistoon sisältyi 281 kuollutta ja 58 elävää oksaa. Elävien ja kuolleiden oksien läpimitta kohtisuorassa puunrungon pituusakselia vastaan (kuoren alta) oli 5. . 40 mm. Kuolleisiin oksiiin sisältyi lahoamisen eri asteita edustavia oksia vasta kuolleista useita vuosia kuolleina olleisiin oksiiin.

Oksien kuormittaminen

Oksien murtolujuus eli murtamiseen tarvittava voima mitattiin jousivaa'alla siten, että oksaan, 20 cm päähän rungosta sijoitettu vaaka kuormitettiin kohtisuoraan alaspäin suuntautuvalla vedolla, kunnes oksa murtui (kuva 1). Murtumahetkellä vallitseva voima rekisteröitiin gramman tarkkuudella. Murtamiseen tarvittavaa voimaa kutsutaan myöhemmin murtovoimaksi. Ennen kuormitusta mitattiin oksan kulma suhteessa runkoon (kuva 1). Kuormituksen jälkeen mitattiin oksan läpimitta kuoren päältä ja alta 5 cm päässä rungosta, oksan tyvilajeneman ulkopuolelta. Tämän jälkeen oksasta, läheltä

murtumaa, otettiin noin 10 cm pitkä näyte, joka punnittiin välittömästi tuoreena ja kuivana (105 °C, 24 h). Samoista näytteistä määritettiin myöhemmin kuivatuoretiheydet, joita käytettiin oksan lahoamisasteen mittalukuna. Mittaukset tehtiin 1. 3.-30. 3. 1981, jolloin lämpötila vaihteli -25 °C - 5 °C. Kokeen aikana vallinnut lämpötila merkittiin ylös 1 °C:n tarkkuudella.



Kuva 1. Oksan kuormitusperiaate.
Fig. 1. Basic principles applied for measuring branch strength.

Murtovoiman suuruus

Laskennassa pyrittiin ensinnäkin kuvaamaan murtamiseen tarvittavien voimien suuruutta. Tätä koskevia tuloksia on esitetty kuvassa 2 erikseen kuolleista ja elävistä oksista. Tulokset on esitetty tässä, kuten myöhemmin, absoluuttisena murtovoimana, ellei toisin ole mainittu.

Odotusten mukaisesti kuolleiden oksien murtokuormitus oli pienempi kuin elävien oksien. Paitsi keskiarvo poikkeavat myös vastaavat jakaumat toisistaan huomattavasti. Kuolleiden oksien murtamiseen tarvittava voima oli useimmissa tapauksissa pienempi kuin 20 kg. Tuoreiden oksien murtamiseen tarvittava voima puolestaan oli yleisimmin 20-30 kg. On kuitenkin syytä korostaa, että niin kuolleiden kuin elävien oksien murtamiseen tarvittava voima kohosi useissa tapauksissa suuremmaksi kuin 10 kg.

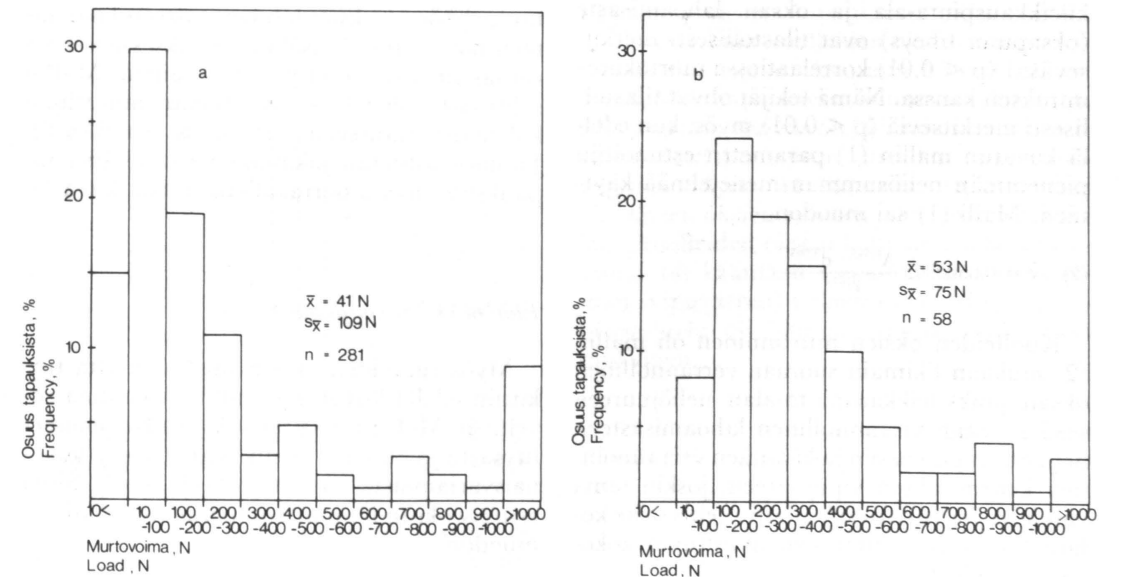
Murtovoiman suuruuden riippuvuus oksan ominaisuuksista

Laskenta

Oksan murtamiseen tarvittavien voimien suuruuden lisäksi pyrittiin selittämään murtamiseen tarvittavan voiman suuruutta oksan ominaisuuksien ja ympäristön, lähinnä lämpötilan avulla. Aineiston alustava käsittely kuitenkin osoitti, että vain oksan läpimitta, oksakulma ja oksan lahoamisaste selittävät murtamiseen tarvittavan voiman suuruutta, kuten oli pääteltävissä myös Heikinheimon (1953) tutkimuksen perusteella.

Lopullisissa analyysissa oksan murtamiseen tarvittavan voiman suuruuden oletettiin olevan suoraan verrannollinen oksan poikkileikkauspinta-alaan ja lahoamisasteeseen sekä kääntäen verrannollinen oksakulmaan eli kuormittavan vipuvarren pituuteen. Näiden tekijöiden vaikutus voidaan ilmaista seuraavasti

$$(1) y = a \frac{A^{b1} \cdot d^{b2}}{(1 \cos(90-\alpha))^{b3}}$$



Kuva 2. Murtovoiman suuruuden jakaumia: (a) kuolleet oksat, (b) elävät oksat.
Fig. 2. Distribution of branch strength: (a) dead branches, (b) living branches.

Taulukko 1. Kuivien oksien murtolujuuteen vaikuttavien tekijöiden välisiä korrelaatioita logaritimuunnoksen jälkeen.

Table 1. Intercorrelations between factors affecting strength of dead branches when subjected to logarithmic transformation.

		X11	X4	X7	X19
Murtovoima	X11	1.000	-0.435	0.618	0.685
Load					
Kuormituspaikka	X4	-0.435	1.000	-0.237	-0.347
Position of load					
Oksan poikkileikkauspinta-ala	X7	0.618	-0.237	1.000	0.435
Cross-sectional area of branch					
Puuaineen tiheys	X19	0.685	-0.347	0.435	1.000
Wood density					

missä y tarkoittaa kuormituksen suuruutta, A oksan poikkileikkauspinta-ala (πr^2 , jossa r tarkoittaa oksan sädettä), d oksapuun tiheyttä, l kuormituksen etäisyyttä rungosta, ja α oksakulmaa sekä a , b_1 , b_2 , b_3 parametrejä. Analyysi tehtiin erikseen elävistä ja kuolleista oksista.

Kuolleiden oksien murtovoima

Kuivien oksien murtovoiman riippuvuus oksan ominaisuuksista on esitetty taulukossa 1. Siitä ilmenee, että tutkituista muuttujista kuormituksen vipuvarren pituus, oksan poikkileikkauspinta-ala ja oksan lahoamisaste (oksapuun tiheys) ovat tilastollisesti merkitsevissä ($p < 0.01$) korrelaatioissa murtokuormituksen kanssa. Nämä tekijät olivat tilastollisesti merkitseviä ($p < 0.01$) myös, kun edellä kuvatun mallin (1) parametrit estimoitii pienemmän neliösumman menetelmää käyttäen. Malli (1) sai muodon

$$(2) y = 0,0000005 \frac{A^{0,578} \cdot d^{3,963}}{1^{0,012}}$$

Kuolleiden oksien murtuminen oli mallin (2) mukaan likimain suoraan verrannollinen oksan poikkileikkauspinta-alan neliöjuureen sekä suoraan verrannollinen lahoamisasteen neljänteen potenssiin ja kääntäen verrannollinen kuormituksen vipuvarreen, joskin tämä vaikutus jää vähäiseksi. Mallin selitysaste kohosi 63 %:iin selitettävän muuttujan kokonaisvaihtelusta.

Laaditun mallin (2) jäännösvaihtelun tarkastelu osoitti mallin epätyydyttäväksi, sillä

jäännösvaihtelun jakauma poikkesi selvästi normaalijakaumasta. Tämän vuoksi tutkittiin malliin (2) sisällytettyjen muuttujien erilaisten kombinaatioiden ja muunnosten selityskykyä tavoitteena jäännösvaihtelun satunnainen jakautuminen. Yksinkertaisimman ratkaisun tarjosi vaihtoehto, jossa malliin sisällytettiin oksan läpimitta sellaisenaan sekä oksan lahoamisaste ja kuormituksen vipuvarren pituus. Malli sai muodon

$$(3) y = 0,00011 \frac{(2r)^{1,765} \cdot d^{3,485}}{1^{0,009}}$$

Mallin (3) mukaan murtokuormitus oli likimain suoraan verrannollinen oksan läpimitaan neliöön ja oksan lahoamisasteen kolmanteen potenssiin. Tässäkin tapauksessa varren (oksakulman) merkitys oli vähäinen. Mallin selitysaste oli 68 % selitettävän muuttujan kokonaisvarianssista (vrt. myös taulukko 2). Jäännösvaihtelun jakauma vastasi tässä tapauksessa hyvin normaalijakaumaa (kuva 3).

Elävien oksien murtovoima

Myös tuoreiden oksien murtolujuutta tutkittiin edellä kuvattuja mallivaihtoehtoja soveltaen. Molemmista tapauksista kokonais selitysaste jäi noin 9 %:iin selitettävän kokonaisvarianssista (vrt. myös taulukko 3). Siinä esitetty oksan läpimitaan perustuva malli sai muodon

$$(4) y = 0,00004 \frac{(2r)^{0,197} \cdot d^{2,108}}{1^{0,680}}$$

Taulukko 2. Kuivien oksien murtolujuuteen vaikuttavien tekijöiden välisiä korrelaatioita logaritimuunnoksen jälkeen.

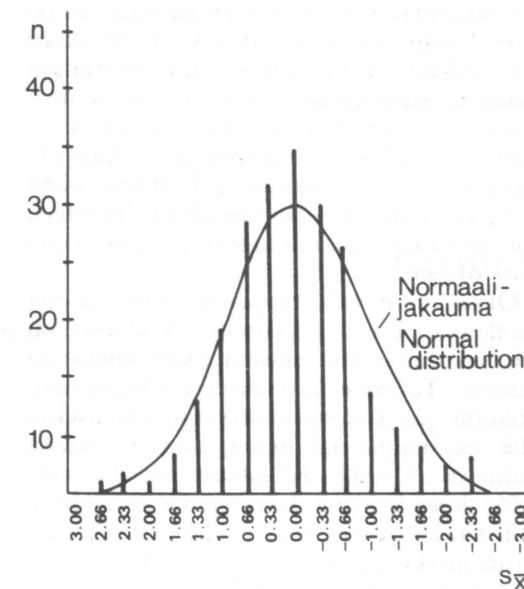
Table 2. Intercorrelations between factors affecting strength of dead branches when subjected to logarithmic transformation.

		X11	X4	X7	X19
Murtovoima	X11	1.000	-0.431	0.718	0.682
Load					
Kuormituspaikka	X4	-0.431	1.000	-0.314	-0.348
Position of load					
Oksan läpimitta	X7	0.718	-0.314	1.000	0.479
Diameter of branch					
Puuaineen tiheys	X19	0.682	-0.348	0.479	1.000
Wood density					

Taulukko 3. Tuoreiden oksien murtolujuuteen vaikuttavien tekijöiden välisiä korrelaatioita logaritimuunnoksen jälkeen.

Table 3. Intercorrelations between factors affecting strength of living branches when subjected to logarithmic transformation.

		X11	X4	X7	X19
Murtovoima	X11	1.000	-0.039	0.114	0.277
Load					
Kuormituspaikka	X4	-0.039	1.000	0.113	0.150
Position of load					
Oksan läpimitta	X7	0.114	0.113	1.000	0.129
Diameter of branch					
Puuaineen tiheys	X19	0.277	0.150	0.129	1.000
Wood density					



Kuva 3. Jäännösvaihtelun jakauman mallia (3) käytettäessä.

Fig. 3. Distribution of residues when applying model (3).

Mallin (4) mukaan oksan läpimitalla ei tuoreiden oksien tapauksessa ollut samaa merkitystä kuin kuolleiden oksien ollessa kyseessä. Sen sijaan oksapuun lujuus (tiheys) sai tässäkin tapauksessa suuren merkityksen, sillä murtumislujuus oli likimain suoraan verrannollinen puuaineen tiheyden toiseen potenssiin. Myös oksakulmalla (vipuvarrella) oli elävien oksien suhteen suurempi merkitys kuin kuolleiden oksien kannalta, sillä murtolujuus oli kääntäen verrannollinen oksakulman (vipuvarren) neliöjuureen. Mallin jäännösvaihtelu oli likimain normaalijakauman mukainen.

TULOSTEN TARKASTELU

Nyt esitettyjä tuloksia männyn oksien murtamiseen tarvittavien voimien suuruudesta on pidettävä vielä alustavina aineiston suppeuden sekä koepuiden valinnaisuuden vuoksi. Tämän vuoksi tulosten tulkinnassa ei murtovoiman absoluuttiselle arvolle tule antaa samaa merkitystä kuin murtovoiman suuruuteen vaikuttaville tekijöille. Erityisesti on syytä korostaa näiden tekijöiden keskinäisiä vaikutussuhteita ja vaikutuksen voimakkuutta, jotka osoittavat eri tekijöiden merkitystä arviointaessa erilaisten oksien karsiutuvuutta.

Oksan murtamiseen tarvittavia voimia on aiemmin tutkinut tiittävästi vain Heikinheimo (1953) puun rungon luontaista karsiutumista käsittelevässä tutkimuksessaan. Hän mittasi kuolleiden oksien murtovoimaa mitaamalla niiden taivutuslujuutta kaavan (5) mukaisesti

$$(5) \quad y = \frac{4 \cdot l \cdot P}{\pi r^3} \cdot \cos \zeta,$$

missä l on vetokohdan etäisyys murtumakohdasta, P voima, y oksan loppuasennon ja vaakasuoran asennon välinen kulma, r oksan poikkileikkauksen säde murtumakohdassa ja ζ oksakulma. Heikinheimo (1953) sai tekemissään mittauksissa männyn oksien keskimääräiseksi taivutuslujuudeksi 8 ... 70 MPa oksan lahoasteesta riippuen. Tässä työssä esitettyjen tulosten vertailu Heikinheimon (1953) saamiin tuloksiin on sikäli vaikeaa, että nyt tutkittiin vain oksien murtamiseen tarvittavaa voimaa ottamatta huomioon murtuman sijaintia ja ominaisuuksia. Toisin sanoen oksan kuormittamiskohta pyrittiin vakiomaan mahdollisimman hyvin.

Saadut tulokset osoittavat elävien ja kuolleiden oksien puuaineen tiheyden vaikuttavan eniten oksan murtamiseen tarvittavan voiman suuruuteen. Puuaineen suuri tiheys jo yksinään lisää murtamiseen tarvittavan voiman suuruutta, jos vertaillaan keskenään eläviä oksia (vrt. Kärkkäinen 1977), sillä elävien oksien murtamiseen tarvittava voima kasvoi toisessa potenssissa oksan puuaineen tiheyden kasvaessa. Nyt saatu tulos on kuitenkin kiinteässä yhteydessä myös oksan lahoamiseen, sillä puuaineen tiheys laskee nopeasti puun lahoamisasteen suuretessa. Saatu tulos on yhdenmukainen Heikinheimon

(1953) saamien tulosten kanssa. Niiden mukaan oksan taivutuslujuus muuttuu oksan lahoamisasteen mukaan seuraavasti.

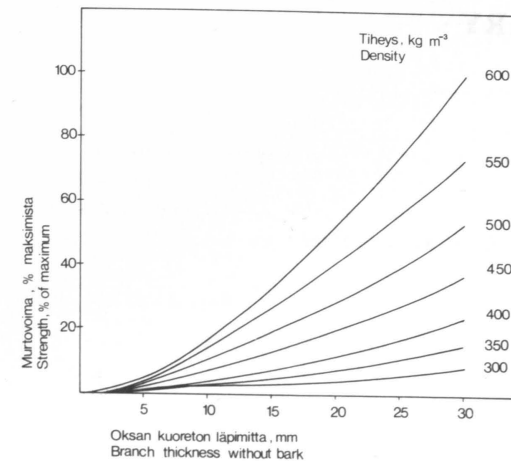
Lahoamisaste	Taivutuslujuus, MPa	Suhteellinen taivutuslujuus, % maksimista
Hiljattain kuollut kova oksa	67	100
Oksassa hiukan lahoa	33	50
Oksassa runsaasti lahoa	7	11

Koska lahoamisasteen määrittäminen oli silmävarainen ja laadullisesti luokitteleva, ei Heikinheimon (1953) saamien tulosten perusteella voida esittää määrällistä arviota lahoamisasteen ja taivutuslujuuden välisestä suhteesta.

Oksan läpimitta (poikkileikkauspinta-ala) vaikutti oksan murtamiseen tarvittavan voiman absoluuttiseen suuruuteen: kuta paksumpi oksa sen suurempi voima. Kuolleiden oksien murtovoima oli lähinnä verrannollinen läpimitan neliöön. Oksan paksuudella on täten varsin suuri vaikutus kuolleiden oksan murtolujuuteen. Elävien oksien läpimitta sen sijaan vaikutti vähän absoluuttiseen murtovoimaan. Läpimitan vaikutus jää elävissä ja kuolleissa oksissa tosin pienemmäksi kuin oksapuun tiheyden vaikutus, sillä murtovoima oli verrannollinen oksan tiheyden kolmanteen potenssiin kuolleissa ja toiseen potenssiin elävissä oksissa.

Oksakulman vaikutus jää sekä elävissä että kuolleissa oksissa vähäiseksi. Vaikutus oli elävissä oksissa tosin selvempi kuin kuolleissa oksissa. Tässäkin tapauksessa oksakulman vaikutus jää kokonaisuudessaan vähäiseksi, sillä oksakulma latvuksen alaosaan oksissa vaihtelee 70–90° (Kellomäki ja Tuimala 1981), joten kuormituksen vipuvarsi vaihtelee vain vähän oksakulman vuoksi. Edellä mainittua merkittävästi pienempi oksakulma, kuten latvuksen yläosassa on laita (Kellomäki ja Tuimala 1981), saattaisi lisätä huomattavasti murtamiseen tarvittavan voiman suuruutta.

Oksan tiheys (lahoaminen) ja läpimitta



Kuva 4. Oksan suhteellisen murtovoiman riippuvuus oksan läpimitasta ja puuaineen tiheydestä.

Fig. 4. Relative strength of branches as affected by branch diameter and wood density.

vaikuttivat yhdessä suuresti oksan murtamiseen tarvittavan voiman suuruuteen, kuten kuvasta 4 ilmenee. Tuloksia laskettaessa on oksakulman vaikutus oletettu vakioksi ja varioitu sitten oksan läpimitan ja puuaineen tiheyden arvoja. Murtolujuus on esitetty prosentteina maksimista, joka on saatu läpimita-arvolla 3,0 cm ja tiheysarvolla 600 kgm⁻³, jolloin murtolujuus saa arvon 100. Vastaava arvo 3,0 cm oksalle tiheysarvolla 450 on 38. Oksan läpimitan pienessä murtolujuus vä-

henee nopeasti kaikilla puuaineen tiheysarvoilla.

Saatujen tulosten perusteella voidaan tehdä myös päätelmiä metsän perustamis- ja kasvatus-tiheyden vaikutuksesta puiden karsiutumiseen. Tiedetään, että tiheyden kasvassa oksan kasvu ja oksan läpimitta jäävät pienemmiksi kuin harvoissa puustoissa. Koska oksan murtolujuus oli verrannollinen oksan läpimitan toiseen potenssiin, se vähenee nopeasti puuston tiheessä. Myös suuri oksakulma voi tiheissä metsissä lisätä kuolleiden oksien karsiutumista.

Toisaalta tiedetään, että tiheässä puustossa puuaineen tiheys – myös oksapuun – on suurempi kuin harvassa puustossa. Tämän vuoksi oksien murtolujuus ei ilmeisesti vähene niin suuresti kuin pelkän oksan läpimitan perusteella olisi pääteltävissä. Koska puuaineen tiheyden vaikutus oli verrannollinen kolmanteen potenssiin, voi tämä osittain mitätöidä oksan läpimitan pienemmisestä aiheutuvan lujuuden vähenemiseen. Tähän viittaa mm. se, että kuolleiden oksien karsiutuminen on tiheissä puustoissa selvästi hitaampaa kuin harvoissa puustoissa (Heikinheimo 1953, Kellomäki ja Tuimala 1981, Jokinen ja Kellomäki 1982). Harvoissa puustoissa tosin lumi ja tuuli karsivat helpommin kuolleita oksia kuin tiheissä puustoissa, mutta myös oksapuun alhainen tiheys harvoissa puustoissa voi nopeuttaa karsiutumista huolimatta siitä, että harvoissa puustoissa oksat ovat paksuja verrattuna tiheisiin puustoihin.

LÄHDEVIITTEET

- HEIKINHEIMO, O. 1953. Puun rungon luontaisesta karsiutumisesta. Summary: On natural pruning of tree stems. *Commun. Inst. For. Fenn.* 41(5): 1–39.
- JOKINEN, P. & KELLOMÄKI, S. 1982. Havainnot metsikön kasvutiheyden vaikutuksesta runkojen oksikkuuteen varttuneissa männyn taimikoissa. Abstract: Observations on the effect of spacing on branchiness of Scots pine stems at pole stage. *Folia For.* 508: 1–12.

- KELLOMÄKI, S. & TUIMALA, A. 1981. Puuston tiheyden vaikutus puiden oksikkuuteen taimikko- ja riukuvaiheen männiköissä. Summary: Effect of stand density on branchiness of young Scots pines. *Folia For.* 478: 1–27.
- KÄRKKÄINEN, M. 1977. Puu, sen rakenne ja ominaisuudet. Helsinki.

SUMMARY

STRENGTH OF SCOTS PINE BRANCHES

Empirical measurements showed that the strength of a dead branch of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) was related to the second power of the branch diameter and the third power of the basic density of branch wood. The same factors affected also the strength of living branches.

Especially, the contribution of wood density was important. The significance of the results are discussed considering the natural processes of self-pruning and its effect on the branchiness of the trees.