

Sahatavaran kierouden vähentäminen kuivauksen keinoin Esiselvitys

Veikko Tarvainen

Antti Hukka

Rakennustekniikka



ISBN 951-38-5157-5 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5158-3 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1997

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Rakennusmateriaalit ja -tuotteet sekä puutekniikka,
Puumiehenkuja 2 A, PL 1806, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 7027

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsmaterial och -produkter, träteknik,
Träkarlsgränden 2 A, PB 1806, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 7027

VTT Building Technology, Building Materials and Products, Wood Technology,
Puumiehenkuja 2 A, P.O.Box 1806, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 7027

Toimitus Leena Ukoski

LIBELLA PAINOPALVELU OY, ESPOO 1997

Tarvainen, Veikko & Hukka, Antti. Sahatavaran kierouden vähentäminen kuivauksen keinoin. Esiselvitys [Minimizing the twisting of sawn timber in drying. Prestudy]. Espoo 1997, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1861. 36 s.

UDK 691.11:674.04

Avainsanat sawn lumber, wood products, twisting, drying tests

Tiivistelmä

Sahatavaran kieroutuminen aiheuttaa sahoilla laadun alenemista ja häiriöitä prosessin eri vaiheissa. Seurauksena on taloudellisia menetyksiä. Jatkojalostuksessa kieroutuneet kappaleet alentavat saantoa ja lisäävät häiriöitä. Esiselvityksenä kartoitettiin kieroutumisen syitä ja etsittiin keinoja pitää kieroutuminen mahdollisimman vähäisenä kuivauksessa.

Sahatavaran muodonmuutokset johtuvat kutistumisen epätasaisuudesta. Kieroutumiseen sekä lape- ja syrjävääräytyteen vaikuttavat puun pituussuuntaisen kutistuman vaihtelut. Puhtaasti lappeiden väliset kutistumaerot johtavat lapevääräytyteen ja vastaavasti syrjävääräytyys johtuu kappaleen leveyden suunnassa ilmenevistä pituus- kutistuman eroista. Kieroutumisen yhtenä syynä ovat poikkileikkauksen lävistäjän suunnassa vallitsevat pituus- kutistumaerot.

Pituuskutistuman vaihtelut johtuvat puun tiheyseroista, nuorpuusta, vinosyisyydestä, kasvuhäiriöistä, esimerkiksi tyvi- tai latvamutka ja lyly, sekä epäsymmetrisestä kesä-kevätpuurakenteesta. Tiheyden ollessa suuri havupuusta syiden suunnassa vähemmän kuin kevyt puuaineksen. Nuorpuun samoin kuin lylyn pituus- kutistuma on paljon suurempi kuin muun puuaineksen. Kevätpuun pituus- kutistuminen on suurempaa kuin tiheän kesäpuun. Myös kuivauksen jälkeinen epätasainen kosteus johtaa muodonmuutoksiin.

Ensisijaisesti muodonmuutoksiin tulisi vaikuttaa raaka-aineen ja sahausasetteen valinnalla. Vuosirengasväliltään tasaisesti kasvaneesta ja suorasta puusta, jossa nuorpuuvyöhykkeessäkin vuosikasvu on samansuuruista muiden osien kanssa, saadaan suoraa sahatavaraa. Ytimen läheltä pienpuusta sahattu pienidimensioinen tavara pyrkii kieroutumaan voimakkaimmin. Vaikeimpia ovat ydinkeskeiset kapeat kappaleet.

Kieroutumista voidaan vähentää sahaamalla mahdollisimman leveitä dimensioita, jotka tarvittaessa vasta kuivauksen jälkeen halkaistaan pienempiin dimensioihin. Samansuuntainen vaikutus saadaan aikaan kuivaamalla sahatavara painon alaisena.

Tutkimuksen mukaan voitiin pienidimensioisen ydinkeskeisen sahatavaran kieroutumista vähentää kuormituksella 30 %. Kuormitus vähentää kieroutumista suhteellisesti eniten voimakkaasti kieroutuvilla puilla.

Kieroutuminen lisääntyy kosteuden aletessa. Sahatavara tulisi kuivata niin, että loppukosteus on mahdollisimman korkea annettujen tavoitearvojen puitteissa. Tämä tarkoittaa myös sitä, että kuivaamon tulee olla hyvässä kunnossa ja kuivauskaavan tasaannutusvaiheineen sellainen, että kosteuden hajonta on pieni. Tällöin keskikosteutta voidaan nostaa ilman, että syntyy liian kosteita kappaleita. Samoin liian kuivien ja samalla voimakkaasti kieroutuneiden kappaleiden osuus vähenee. Mittausten mukaan ydinkeskeiset pienidimensioiset puut kieroutuivat 30 % enemmän, jos ne kuivattiin 16 %:n kosteuden asemesta 12 %:n kosteuteen.

Tehtyjen kokeiden mukaan kuivauslämpötila ei vaikuta selvästi kuormittamattomien puiden kieroutumiseen, kun se on 60 - 120 °C. Koekuivauksissa tulee vielä selvittää kuorman painon ja kuivauslämpötilan mahdollinen yhteisvaikutus kieroutumiseen.

Tarvainen, Veikko & Hukka, Antti. Sahatavaran kierouden vähentäminen kuivauksen keinoin. Esiselvitys [Minimizing the twisting of sawn timber in drying. Prestudy]. Espoo 1997, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes 1861. 36 p.

UDC 691.11:674.04

Keywords sawn lumber, wood products, twisting, drying tests

Abstract

Twisting of sawn timber causes value losses and breakdowns in the saw mill process after drying and also in further processing. In this prestudy the causes of twisting and methods to minimise twisting in drying are presented.

The basic reason for warping is uneven shrinkage of sawn timber. Twisting, bow and crook are initiated by variations in the longitudinal shrinkage of boards. Bow is caused by a difference in shrinkage on the opposite flat sides. Crook is result of uneven shrinkage of opposite cants. Difference in lengthwise shrinkage between diagonal opposite edges is one cause for twisting.

Shrinkage variations are mainly caused by density differences, juvenile wood, spiral grain and growth defects like topbreak and compression wood. The length shrinkage of softwoods is in dense parts lesser than in zones of low density. The longitudinal shrinkage of juvenile wood and compression wood is higher than in normal wood. Earlywood shrinks more than latewood. Also uneven moisture content initiates warping especially if the sawn timber is ripped after drying.

Avoidance of twisting should in the first place be attempted by a proper selection of raw materials and sawing patterns. From straight round wood with even and small annual ring thickness also in juvenile wood it is possible to get straight timber. Small-sized timber sawn out of small logs near the pith tends to twist most. Worst is timber with pith inside.

Twisting can be diminished by sawing boards as wide as possible. The ripping to smaller dimensions should take place after drying. In most cases this saw-dry-rip method (SDR) is advantageous. Loading the staple in drying with for example concrete plates has the same

kind of effect. In this study the twisting of small-sized lumber with pith inside was reduced by 30 % when the staple was loaded compared to unloaded timber. The reduction is relatively strongest when tendency to twisting is highest.

Twisting increases with decreasing wood moisture content. Thus it is advantageous to dry the timber in such a way that the final moisture be as high as possible within the given limits. This means also that the drying kilns have to be in proper condition so that the moisture content deviation is small. A conditioning phase after drying is also recommended for diminishing MC deviation and the amount of too dry and therefore twisted pieces. The average MC can be risen without too large amount of wet timber. In drying test the twisting of small-sized timber with pith inside increased by 30 % when MC decreased from 16 % to 12 %.

In laboratory tests it was found no effect of drying temperature on twisting in the temperature range of 60 - 120 °C.

Alkusanat

Sahateollisuudessa on entistä enemmän korostunut sahatavaran kieroutuminen alhaisiin kosteuksiin kuivauksen ja pieniläpimittaisten puiden käytön johdosta. Kieroutumisen aiheuttamat ongelmat ja taloudelliset tappiot ovat niin suuret, että Teknologian kehittämiskeskus (TEKES) ja Suomen Puututkimus Oy päättivät sisällyttää kierouden vähentämismahdollisuuksia koskevan esiselvityksen TEKESin Puun mekaanisen teknologian (PMT) teknologiaohjelmaan.

Tutkimuksen johtoryhmään kuuluivat kehitysjohtaja Seppo Vainio Enso-Gutzeit Oy:stä, kehitysjohtaja Kalevi Asikainen Kaukas Oy:stä, professori Tero Paajanen Teknillisestä korkeakoulusta, tutkimuspäällikkö Ilmari Absetz TEKESistä ja tutkimuksen vastuullinen johtaja, tutkimusprofessori Alpo Ranta-Maunus VTT:stä. Projektin tutkijoina olivat Antti Hukka ja allekirjoittanut.

Veikko Tarvainen

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	5
ALKUSANAT	7
1. JOHDANTO	10
2. AIEMMAT TUTKIMUKSET	11
2.1 Sahatavaran kieroutumisen syyt	11
2.1.1 Pitkittäiskutistuman luonnolliset vaihtelut ja niiden vaikutus muodonmuutoksiin	12
2.1.2 Lylyn (reaktiopuun) vaikutus sahatavarakappaleen pituussuuntaiseen kutistumaan ja muotovikoihin	14
2.1.3 Rungon kierteisyyden vaikutus sahatavarakappaleen kutistumiseen ja kieroutumiseen	14
2.1.4 Muita kieroutumista aiheuttavia tekijöitä	20
3. KIEROUTUMISTA VÄHENTÄVÄT TOIMENPITEET	21
3.1 Raaka-aineen valinta	21
3.2 Sahausasetteen valinta	21
3.3 Sahatavaran käsittely ennen kuivausta	22
3.4 Kuivausvaiheen vaikutus kieroutumiseen	23
4. KUIVAUSKOKEET	24
5. KUIVAUSKOKEIDEN TULOKSET	26
5.1 Lämpötilatason vaikutus sahatavaran kieroutumiseen	26

5.2 Kuivauksessa kieroutuneiden puiden höyrytys painon alaisena	27
5.3 Pienläpimittaisen kuusen keskitavaran kuivaus painon alaisena ja ilman painoja eri kosteuksiin	28
5.4 Kuusen keskitavaran (44 x 150 mm²) kuivaus painon alla oikeakätisesti kierrettynä	31
5.5 Nelisahatun ja läpisahatun puun kieroutuminen kuivauksessa	32
6. YHTEENVETO KESKEISISTÄ TULOKSISTA	33
KIRJALLISUUTTA	35

1. Johdanto

Kieroutunut sahatavara aiheuttaa sekä sahatteollisuudessa että ennen kaikkea sahatavaran jatkojalostuksessa teknisiä ongelmia ja taloudellisia tappioita. Sahatavarakuljettimilla syntyy häiriötilanteita, jotka sitovat henkilökuntaa siinä määrin, että varsinainen päätyö häiriintyy. Jatkojalostuksessa häiriöiden lisäksi ongelmaksi muodostuu pieni saanto. Raaka-ainetta voidaan käyttää vain lyhyinä pätkinä, jotta kierous olisi höyläyksellä oikaistavissa.

Suurin ongelma on kieroudesta kuitenkin puutuotteiden käytössä. Mikäli sahatavara tai sen jatkojalosteet käyttökohteeseen tuotaessa ovat kieroutuneita, vaikeutuu rakennustyö eikä lopputulos vastaa odotuksia. Asiakas on taipuvainen vastoinkäymisiä kohdatessaan vaihtamaan tavaran toimittajaa ja pahimmassa tapauksessa luopumaan puun käytöstä.

Sahatavaran kieroutta koskevat valitukset ja kyselyt ovat viime vuosina voimakkaasti lisääntyneet. Keskusteluun ovat oman lisänsä tuoneet japanilaiset, joiden mielestä Suomessa ei osata kuivata puuta niin, ettei se kieroutuisi.

Puu kieroutuu lähinnä puun luonnollisten ominaisuuksien takia. Puun syykulma sahatavaran pituussuuntaan nähden vaihtelee ja on riippuvainen mm. siitä, mistä kohdasta tukkia tarkasteltava tavara on sahattu. Ongelmallisimpia ovat puut, jotka on sahattu ytimen läheltä ja sisältävät paljon nuorpuuta. Niiden taipumus kieroutumiseen kuivauksessa on voimakkainta.

Puun muodonmuutokset, mukaanlukien kierous, ovat sitä voimakkaampia, mitä alhaisempaan loppukosteuteen puu joudutaan kuivaamaan. Tutkimusten mukaan puun pituuden suuntainen kutistuminen on tuoreesta noin 18 %:n kosteuteen vähäistä ja voimistuu huomattavasti tätä alhaisempiin kosteuksiin kuivattaessa. Sahojen jatkuvasti lisääntynyt asiakaslähtöinen toiminta on johtanut siihen, että puut kuivataan jo sahalla loppukäytön mukaiseen kosteuteen (6 - 15 %), kun perinteisessä vientikuivauksessa tavoite on ollut 18 - 20 %. Jatkojalostusteollisuudelle kieroutuminen on ollut ongelma jo pidemmän aikaa, koska se on itse jatkokuivannut vientikuivan tavaran.

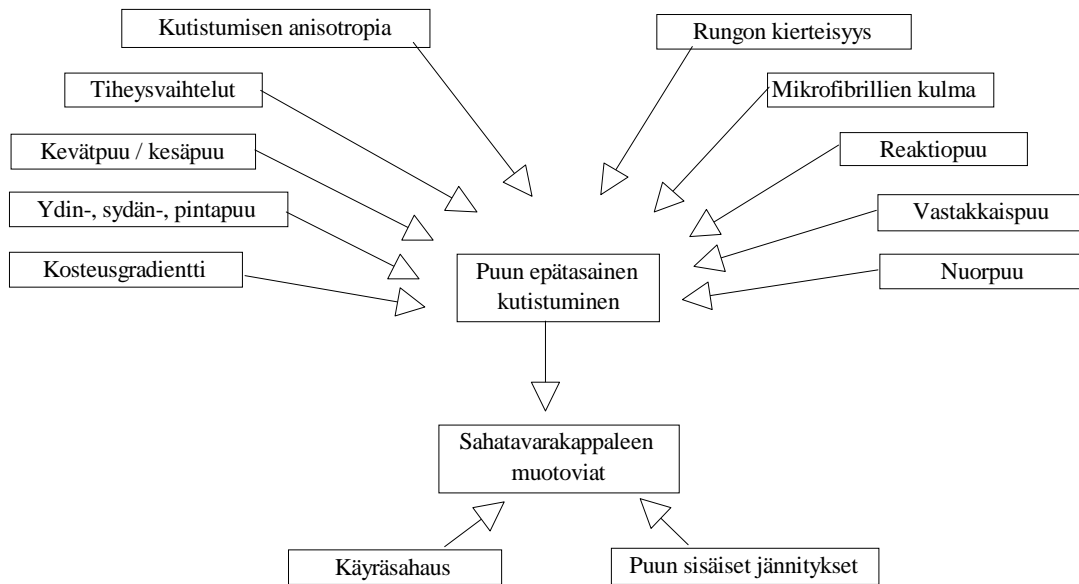
Kieroutumisen aiheuttamien työstöhävikkien ja toimintahäiriöiden voidaan arvioida aiheuttavan useiden kymmenien miljoonien markkojen tappiot vuosittain Suomessa.

Tutkimuksen päätavoite on löytää keinot minimoida sahatavaran kieroutuminen erilaisin kuivausprosessissa tehtävin toimenpitein. Toisena tavoitteena on mitata tehokkaimmiksi mainittujen menetelmien todelliset kieroutta vähentävät vaikutukset.

2. AIEMMAT TUTKIMUKSET

2.1 Sahatavaran kieroutumisen syyt

Sahatavaran muotoviat (kierous, lape- ja syrjävääritys sekä kupertuminen) aiheutuvat pääasiassa puun epätasaisesta kutistumisesta. Kolmeen ensin mainittuun muotovikaan vaikuttavat ratkaisevasti puun pituuskuistuman erot eri puolilla kappaletta. Kuvassa 1 esitetään puun epätasaisen kutistumisen ja siitä johtuviin sahatavaran muotovikoihin vaikuttavia tekijöitä



Kuva 1. Sahatavarakappaleen muotovian syntyyn vaikuttavia tekijöitä (Kuusela 1983).

2.1.1 Pitkittäiskutistuman luonnolliset vaihtelut ja niiden vaikutus muodonmuutoksiin

Ydin-, sydän- ja pintapuun pitkittäiskutistumien erot

Ytimen läheisyydessä olevan puuaineksen, nuorpuun, ominaisuudet poikkeavat selvästi sitä ympäröivän osan ominaisuuksista. Nuorpuuvyöhykkeen vahvuus on 2 - 30 vuosilustoa (Kärkkäinen 1985). Bouteljen (1968) mukaan kuusella on tyviosassa nuorpuuta 20 - 30 vuosirengasta ja latvaosassa vain 4 - 8 vuosirengasta. Nuorpuun trakeidit ovat lyhyet ja ohutseinämäiset. Nuorpuun tiheys on alhainen. Lisäksi kutistuminen ja turpoaminen poikkeavat muusta puuaineksesta siksi, että monilla puulajeilla mikrofibrillien nousukulma solun pituusakseliin nähden on suuri (esim. Zobel 1961). Kuusella ei näin kuitenkaan ole asianlaita.

Männyllä puun tiheys kasvaa ytimestä pintaan päin siirryttäessä. Tästä on seurausena pinta- ja sydänpuun kutistumisen ero.

Pitkittäiskutistuman riippuvuus tiheydestä

Monilla puulajeilla pituuden suuntainen kutistuminen vähenee tiheyden kasvaessa. Siimeksen (1938, s. 110) mukaan suomalaisen männyn pituuskuutistuma on 0,28 % kuivatuoretiheyden ollessa 300 kg/m³. Kun kuivatuoretiheys on 500 kg/m³, on kutistuma vain 0,13 % tuoreesta absoluuttisen kuivaksi. Muillakin puulajeilla on saatu vastaavia tuloksia. Siimes esittää männyn pituuden suuntaiselle kutistumiselle seuraavan yhtälön:

$$\beta_1 = 0,5 - 0,74 \rho_r, \quad (1)$$

jossa ρ_r on suhteellinen kuiva-tuoretiheys.

Männyn kuivatuoretiheys kohoaa hidastuvalla nopeudella ytimestä pintaan päin. Tammisen (1962) mukaan ruotsalaisen männyn ytimen ja pinnan välinen tiheysero oli 25 - 109 kg/m³ 10 %:n korkeudelta mitattuna. Hakkilan (1966) tutkimuksen mukaan 41 - 80-vuotiailla männyllä puun pinnan ja ytimen tiheysero oli 10 %:n korkeudella 96 kg/m³, 40 %:n korkeudella 56 kg/m³ ja 70 %:n korkeudella enää 19 kg/m³. Tutkimuksessa ytimeksi katsottiin 10 % poikkileikkauksen sisimmästä pinta-alasta. Pinnaksi luettiin uloin 50 % pinta-alasta. Ydinosan säde on siten 0,31 x R, ja pintaosa alkaa säteen ollessa 0,71 x R, kun R on puun poikkileikkauksen säde.

Kuusen tiheys muuttuu vain vähän ytimestä pintaan päin mentäessä.

Kevät- ja kesäpuun suhteen vaikutus pitkittäiskutistumaan

Kevätpuu kutistuu pituuden suunnassa eräiden tutkimusten mukaan noin kaksinkertaisesti kesäpuuhun verrattuna. Selityksenä voi olla mikrofibrillien puun pituusakseliin nähden suurempi kulma kevätpuussa kuin kesäpuussa (Kennedy ja Ifju 1962, Hiller 1964 ja McMillin 1973). Tästä voi olla seurauksena, että puu, jonka tiheys on suuri, ja joka sisältää runsaasti kesäpuuta, kutistuu vähemmän kuin kevyt puu, jossa on vähän kesäpuuta (Choong 1969).

Barrett ym. (1972) ovat kehittäneet matemaattisen mallin, jonka mukaan havupuilla suurin pituuden suuntainen kutistuminen on kevätpuussa, seuraavaksi suurin reaktiipuussa ja vähäisin kesäpuussa.

Monilla puulajeilla tiheys korreloi negatiivisesti vuosiluston paksuuden kanssa. Toisin sanoen puun pituuden suuntainen kutistuminen lisääntyy vuosiluston paksuuden kasvaessa.

Edellä esitettyjen puun luonnollisten pituuskutistuman vaihtelujen vaikutusta lapevääryyteen voidaan esimerkinomaisesti tarkastella 50 mm paksulla tavaralla. Oletetaan lapevääryyden johtuvan pintalappeen ja sydänlapeen puuaineksen erilaisesta tiheydestä (450 kg/m^3 pintapuussa ja 350 kg/m^3 ytimen lähellä). Tällöin puun pituuskutistuma sahatavarakappaleen pinta- ja sydänlapeella on Siimeksen (1938, s. 84, 110) mukaan

$$\beta_{\text{sydän}} = 0,5 - 0,74 \times 0,35 = 0,241 \% \text{ ja} \quad (2)$$

$$\beta_{\text{pinta}} = 0,5 - 0,74 \times 0,45 = 0,167\% . \quad (3)$$

Tuoreena yhden metrin mittainen puu on absoluuttisen kuivana pintalappeeltaan 998,33 mm ja sydänlapeeltaan 997,59 mm pitkä. Kaarevuussäteeksi muodostuu 67 m ja lapevääryydeksi 7,5 mm 2 metrin matkalla. Lajitteluohjeen ”Pohjoismainen Sahatavara” mukaan yli 44 mm paksulla tavaralla sallitaan A1- ja A2-luokissa 5 mm:n lapevääräisyys 2 m:n matkalla vientikuivassa sahatavarassa. Tämä arvo ei esimerkkitapauksessa ylittyisi vientikuivauksessa, mutta jos sama vaatimus esitetään puusepäнкуivalle sahatavaralle, on mainittu tiheysero jo niin suuri, että lapevääräisyys on lähellä sallitun ylärajaa. Tarkkoja lukuarvoja ei voi esittää, koska pituuskutistuma ei ole kosteuden suhteen täysin lineaarista.

Näyttää siltä, että tavanomaisesti kasvaneella puulla tiheyseroista johtuvat muodonmuutokset ovat yleensä sallituissa rajoissa myös puusepäнкуivatulla sahatavaralla. Sen sijaan voimakkaat kasvuolosuhteiden muutokset niin, että sydänosan ja pintaosan tiheysero tulee tavanomaista suuremmaksi, voivat johtaa haitallisiin muodonmuutoksiin.

2.1.2 Lylyn (reaktiopuun) vaikutus sahatavarakappaleen pituussuuntaiseen kutistumaan ja muotovikoihin

Lyly aiheuttaa sahatavaran vääntyilyä ja halkeilua normaalia suuremman syiden suuntaisen kutistumisensa johdosta. Pituuden suuntainen kutistuminen tuoreesta kuivaksi voi olla jopa 6 - 7 % (Cotê ja Day 1965). Ollinmaan (1959) mukaan kuusen pituuden suuntainen kutistuminen tavallisessa puussa on 0,3 % ja reaktiopuussa 2,4 %.

Lylypuun solujen sekundääriseinämän keskikerroksen mikrofibrillien kulma pituusakseliin nähden on suurempi kuin normaalipuussa. Esimerkiksi Ollinmaan (1959) mukaan männyllä, kuusella ja katajalla mikrofibrillien kulma oli normaalipuussa 24 - 27°, mutta lylypuussa 34 - 40°. Tämä ja lylypuun sekundääriseinämän ulkokerroksen epänormaalin suuri paksuus selittävät paljolti suuren pituudensuuntaisen kutistumisen.

2.1.3 Rungon kierteisyyden vaikutus sahatavarakappaleen kutistumiseen ja kieroutumiseen

Kierteisyydellä tarkoitetaan puun solukkojen pääasiallisen suunnan poikkeamista rungon pituussuunnasta. Kierteisyyden aste ilmoitetaan syiden ja rungon tai puun osan pituusakselin välisenä kulmana. Tavallisesti kulma on vain muutamia asteita, mutta voi olla jopa 40 ° (Noskowiak 1963).

Sahatavaran syiden suunnan poikkeamaa kappaleen pituusakselin suunnasta nimitetään vinosyisyydeksi. Vinosyisyys on sahoilla suurin syy puun kieroutumiseen. Viitaniemen (1988) mukaan suomalainen mänty (*Pinus Silvestris* L.) noudattaa hyvin havupuille tyypillistä kierteisyyttä. Kierteisyys alkaa hyvin loivana mutta saavuttaa nopeasti maksimiarvon vasenkierteisyytenä 15 - 20 vuoden iässä. Tämän jälkeen kierteisyys vähenee ja muuttuu oikeakierteisyydeksi puun ollessa 60 - 80 vuoden ikäinen. Kuusen (*Picea abies* L. Karst) kierteisyys sen sijaan ei ole yhtä systemaattista kuin männyn. Kuusessakin on nähtävissä alkuvuosien muutos vasenkierteiseksi ja vanhemmalla iällä muutos oikeakierteiseksi.

Krempl'in (1970) mukaan kuivattujen lautojen kiertyminen riippuu pääasiassa tekijästä F/r , jossa F on puun kierteisyys ja r etäisyys ytimestä. Toisin sanoen rungon kierteisyyden kasvaessa sahatavaran kieroutuminen lisääntyy ja toisaalta vähenee ytimestä pintaan päin. Tulokset osoittavat myös, että lautojen leveyden ja leveyspaksuussuhteen kasvaessa kieroutuminen vähenee, ilmeisesti siksi, että tällöin laudan kieroutuminen estyy tehokkaasti kuivauskuormassa. Lisäksi leveän sahatavaran laidoilla oleva puuaines ei edellä esitetyn mukaan ole taipuvainen

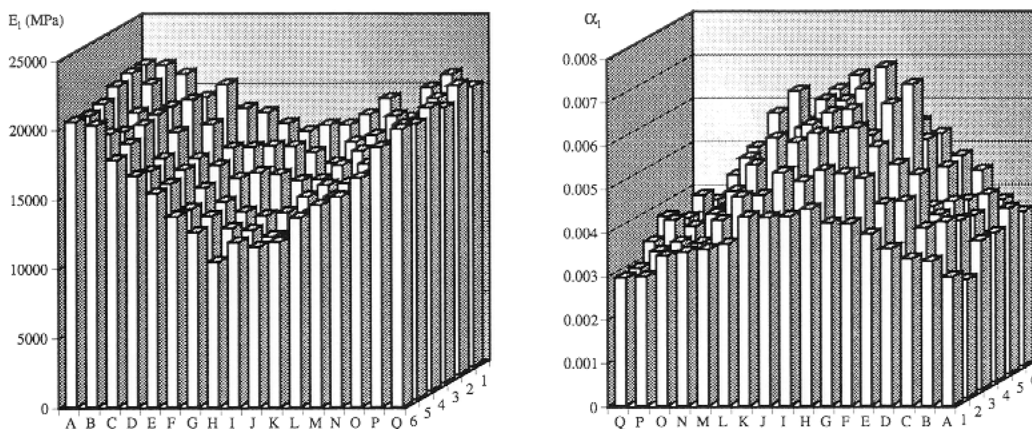
kieroutumaan ja vähentää siten lähempänä ydintä olevan sahatavaran osan kieroutumismahdollisuuksia.

Sahatavarakappale pyrkii kuivuessaan ja kutistuessaan kupertumaan syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Vinosyisissä kappaleissa tällainen kupertuminen johtaa usein kieroutumiseen (Esping 1988).

Lundin yliopistossa on mallinnettu kuusisahatavaran (*picea abies*) kieroutumistaipumusta ja tarkasteltu mallin avulla pituuskutistuman, pituuden suuntaisen kimmomoduulin ja vinosyisyyden vaikutusta kieroutumiseen (Ormarsson 1995, Ormarsson ym. 1996 ja Dahlbom ym. 1996). Tulokset ovat pitkälti yhteneviä muiden tutkijoiden saamien tulosten kanssa. Mallinnuksen etuna on mahdollisuus tarkastella vapaasti eri tekijöitä erikseen tai yhdessä ilman laajoja kokeellisia tutkimuksia.

Tutkimuksissa on tarkasteltu kierteisyyden vaikutusta olettamalla kierteisyyden olevan vakio tai muuttuvan, kun etäisyys ytimestä kasvaa (taulukko 1). Jälkimmäisessä mallissa puu muuttuu vasenkierteisestä oikeakierteiseksi puun tarkasteltavan kohdan ollessa 10 cm kauempana ytimestä. Puun syiden suuntainen kimmomoduuli on oletettu joko vakioksi tai ytimestä lasketun etäisyyden mukaan muuttuvaksi. Lisäksi on otettu huomioon pituuskutistuma ytimestä lasketun etäisyyden mukaan sekä vakiona että muuttuvana. Laskennassa käytetyt yhdistelmät on esitetty taulukossa 1.

Kuvassa 2 ovat Ormarssonin (1995) esittämät ja Wormuthin (1993) mittauksiin perustuvat pituussuuntaisen kimmomoduulin ja pituuskutistuman vaihtelu sahatavarakappaleessa. Ydin on "takaseinällä" keskellä.

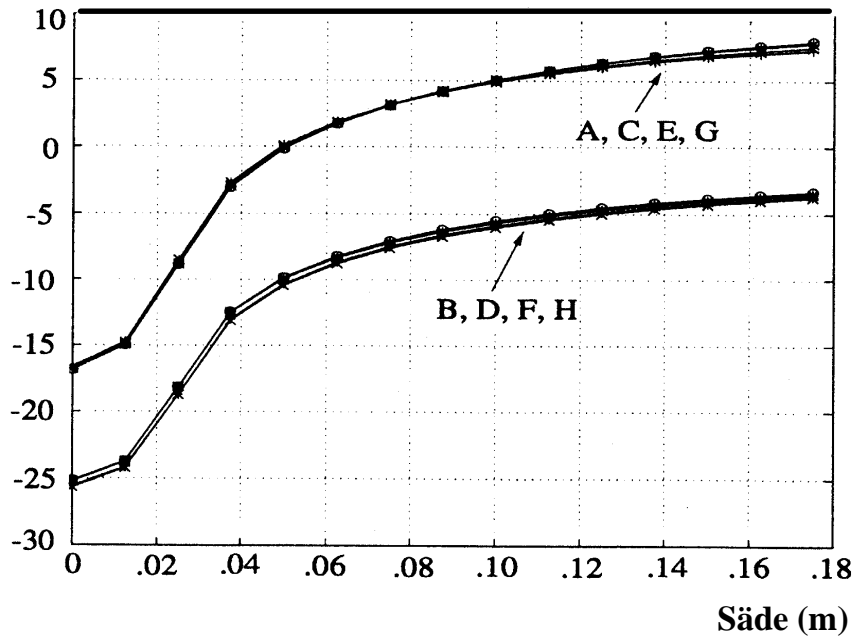


Kuva 2. Kokeellisesti määritetyt sahatavaran pituussuuntainen kimmomoduuli ja kutistumiskerroin (Ormarsson 1995).

Taulukko 1. Kuvan 3 simulointilaskennassa käytetyt sahatavaran kimmomoduuli E_l , pituuskiintuma α_1 ja vinosyisyys θ . Säde r ilmoittaa sahatavaran poikkileikkauksen keskipisteen etäisyyden ytimestä (Ormarsson ym. 1996).

Kappale	E_l (MPa)	α_1	θ (asteita)
A	$9\,700 + 100\,000r$	$0,0071 - 0,038r$	$4 - 40r$
B	$9\,700 + 100\,000r$	$0,0071 - 0,038r$	4
C	$9\,700 + 100\,000r$	0,0071	$4 - 40r$
D	$9\,700 + 100\,000r$	0,0071	4
E	9 700	0,0071	$4 - 40r$
F	9 700	0,0071	4
G	9 700	$0,0071 - 0,038r$	$4 - 40r$
H	9 700	$0,0071 - 0,038r$	4

Kieroutuminen (°)



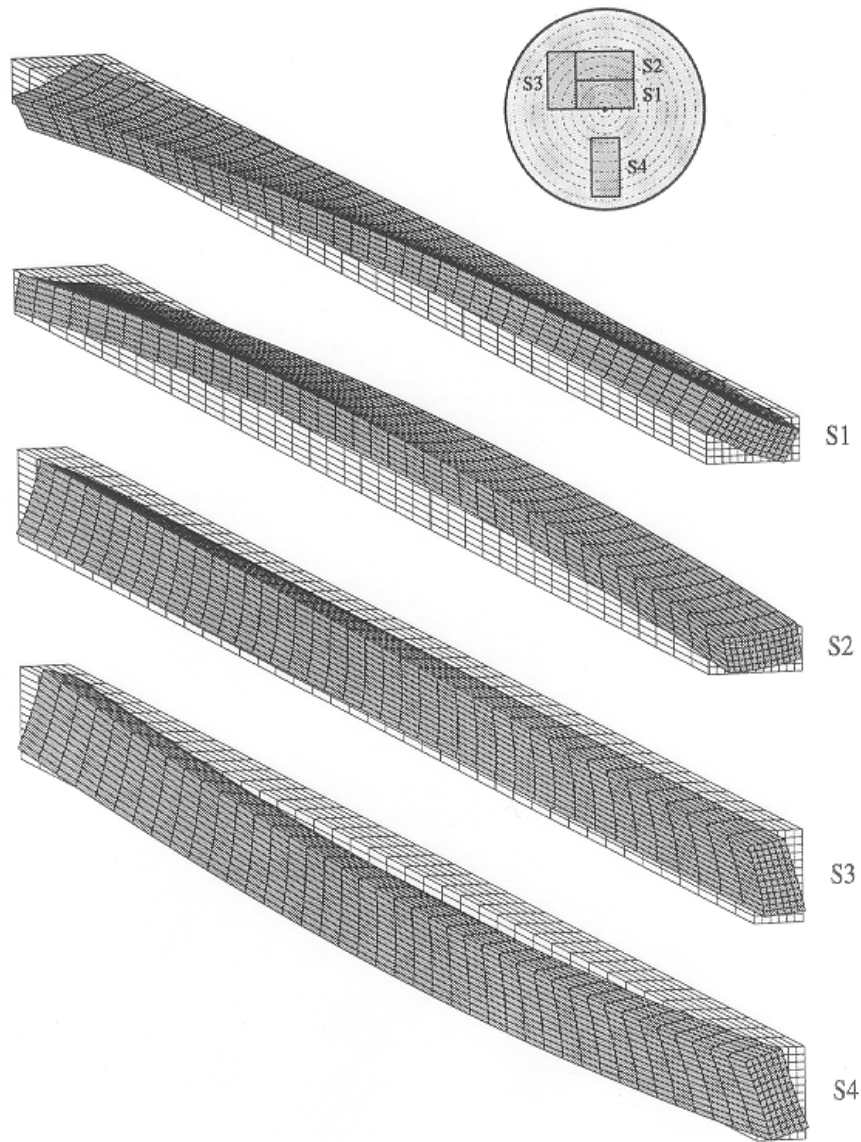
Kuva 3. Kuusisahatavarakappaleen kieroutumisen riippuvuus sen keskipisteen etäisyydestä ytimestä. Sahatavaroiden ominaisuudet on esitetty taulukossa 1. Dimensio on 50×100 mm, ja puu on simuloitu kuivatuksi 10,75 %:n loppukosteuteen (Ormarsson ym. 1996).

Kuvan 3 ylemmät käyrät kuvaavat kieroutumista, kun vinosyisyys muuttuu ytimestä lasketun etäisyyden funktiona. Alemmissä käyrissä vinosyisyys on vakio. Mallin mukaan vinosyisyys ja vuosirenkaiden asento (kappaleen etäisyys ytimestä) määräävät näin ollen lähes yksinomaan kieroutumisen suuruuden. Kimmomoduulin tai pituuskutistuman muutoksella ei mallin mukaan näytä olevan vaikutusta kieroutumiseen.

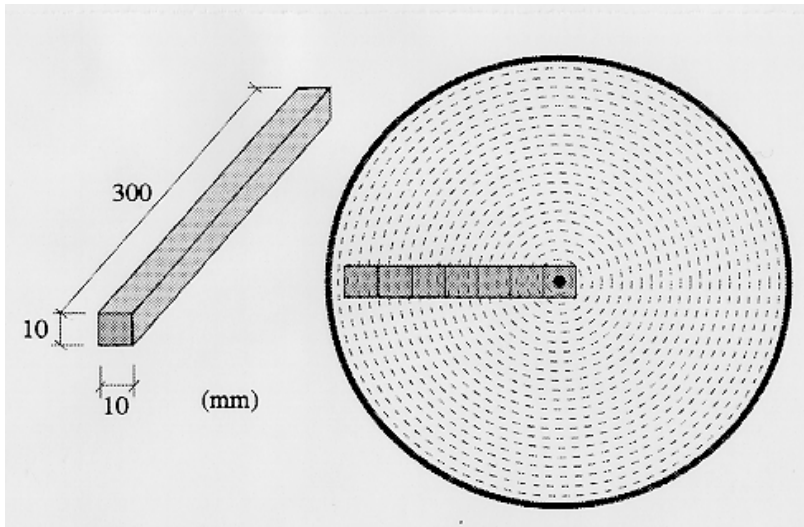
Kuvassa 4 on esitetty eri kohdista puun poikkileikkausta sahattujen soirojen muodonmuutokset.

Ytimen vierestä sahattu lankku (S1) kieroutuu, ulompaa sahattuun kappaleeseen (S2) syntyy lapeväääryyttä epätasaisen pituuskutistuman johdosta. Kappaleessa S4 syntyy epätasaisen pituuskutistuman johdosta vain syrjäväääryyttä. Kappaleessa S3 on kaikkia mainittuja muodonmuutoksia.

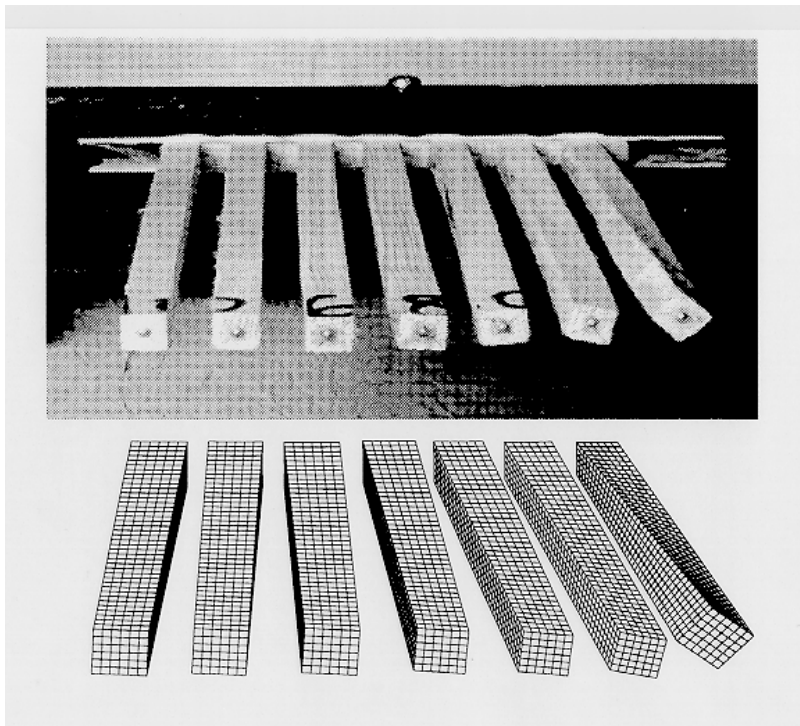
Ormarsson on verrannut myös mallilla laskettuja kieroutumisia kuivauskokeiden tuloksiin. Puusta on sahattu ytimestä lähtien 10 x 10 mm:n rimoja (kuva 5). Tulokset ovat nähtävissä kuvassa 6.



Kuva 4. Sahatavaran muodonmuutosten riippuvuus sen sijainnista poikki-leikkauksessa. Dimensio on $50 \times 100 \text{ mm}^2$, ja puu on simuloitu kuivatuksi 10,75 %:n loppukosteuteen (Ormarsson 1995).



Kuva 5. Puusta sahatut ja mallilla simuloitut rimat (Ormarsson 1995).



Kuva 6. Kuvan 5 mukaisesti sahattujen rimojen kieroutuminen kuivauksessa (Ormarsson 1995).

2.1.4 Muita kieroutumista aiheuttavia tekijöitä

Kuivauksen jälkeen sahatavarakappaleissa on yleensä suuri kosteusgradientti, mikäli puita ei ole tasaannutettu. Jos sahatavara halkaistaan ja työstetään siten, että valmiissa kappaleessa kosteusjakauma on poikkileikkauksessa epäsymmetrinen, pyrkii puu muuttamaan muotoaan kosteuden tasaantuessa (Esping 1983).

Puun kutistuminen on jonkin verran suurempaa korkeissa lämpötiloissa kuivattaessa verrattuna mataliin lämpötiloihin. Tämän perusteella on odotettavissa esimerkiksi kuumakuivatuilla puilla suurempia muodonmuutoksia kuin lämminilmakuivauksessa, jos puut eivät ole olleet kuormitettuna kuivauksessa (Esping 1983).

3. KIEROUTUMISTA VÄHENTÄVÄT TOIMENPITEET

Sahatavaran kieroutuminen on yleismaailmallinen ilmiö. Suomalaisten puiden kieroutumistaipumukset eivät ole suinkaan mitenkään poikkeukselliset. Keskeisimmät syyt ongelman korostumiseen ovat kuivaaminen alhaisiin loppukosteuksiin ja pienläpimittaisen puun lisääntyvä käyttö. Sahattaessa pienpuuta ovat dimensiot pieniä eikä ytimen lähellä olevan puuaineksen voimakasta kieroutumistaipumusta ole kompensoimassa vähemmän kieroutuvaa puuainesta, kuten on laita suuria dimensioita sahattaessa.

3.1 Raaka-aineen valinta

Kieroutumista aiheuttavien pituuskutistumavaihtelujen minimoimiseksi kannattaa valita sahaukseen sellaisia tukkeja, joiden vuosirengasvälit eivät vaihtele voimakkaasti. Etenkin alkuvuosinaan erittäin nopeakasvuiset puut ovat epäedullisia. Pituuskutistuma on suurta verrattuna myöhemmässä vaiheessa muodostuvaan tiheämpään puuainekseen. Riippuen sahausasetteesta pyrkii muodostumaan kieroutta, lape- tai syrjävääräyttä tai kaikkia samanaikaisesti.

Haluttaessa sahatavaraa, joka kieroutuu vain vähän tai ei ollenkaan, joudutaan valitsemaan raaka-aineeksi laadukkaita, melko suuria tukkeja.

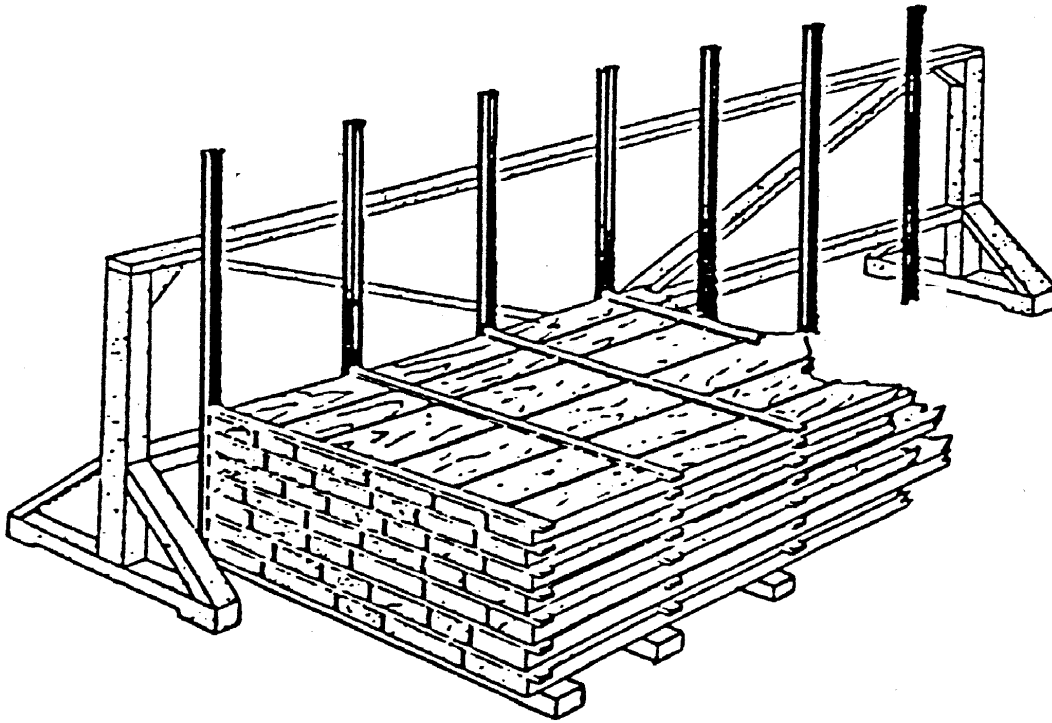
3.2 Sahausasetteen valinta

Asetteen valinnalla voidaan välttää ytimen joutuminen sahatavaraan, jonka kierouden tulisi olla mahdollisimman vähäistä. Sahattaessa pariton määrä sydäntavaraa ydin joutuu keskimmäisen kappaleen keskelle. Jos tämä tavara voidaan käyttää kieroutumisesta huolimatta taloudellisesti hyödyksi esimerkiksi lyhyeksi katkottuna, on menettely kannattavaa. Ulommaiseta sydäntavarat ovat yleensä paljon vähemmän kieroiluun taipuvaisia, ja siten laatutappiota syntyy vähän. Eräänä vaihtoehtona on ”ydinvapaa sahaus”, mikä tarkoittaa sitä, että keskimäinen sahatavara on muuta sydäntavaraa ohuempi lauta. Pääasiallinen tavoite on poistaa ytimen haitallinen vaikutus paitsi kierouteen myös muuhun laatuun mahdollisimman vähällä raaka-aineen kulutuksella. Lisäksi ohuen, kieroutuneen tavaran ”pakottaminen” liimattaviin tai muuten kiinnitettäviin rakenteisiin on paljon helpompaa kuin paksunnan sydäntavaran.

Sahatavaran kieroutuminen kuivauksen aikana estyy rimapaketissa, jota kuorimitetaan sen päälle laitettavilla painoilla. Painojen tehokas vaikutus edellyttää sitä, että sahatavara on tasapaksua. Mikäli sahatavaran paksuusvaihtelut ovat suuret, voivat ohuimmat kappaleet kieroutua painoista huolimatta.

3.3 Sahatavaran käsittely ennen kuivausta

Sahattu tavara kulkeutuu dimensiolajittelijan kautta rimoitukseen. Olennaista on, että sahatavarat pysyvät lokeroissa kohtuullisen suorina eivätkä pääse esikuivumaan. Rimoituksessa on tärkeää, että rimoja on riittävästi eli vähintään 7 kpl 6 m leveää pakettia kohti. Rimojen tulee olla päällekkäisissä kerroksissa ehdottomasti samassa pystylinjassa. Koneellisessa rimoituksessa tämä vaatimus voidaan yleensä täyttää, mutta etenkin pienimmillä sahoilla käytössä on vielä käsinrimoitus. Kuvassa 7 on esimerkki käsinrimoituksen aputelineestä. Trukkialuspuut tulee aina laittaa rima-rivistön kohdalle. Muuten sahatavarat taipuvat.



Kuva 7. Piensahoille soveltuva käsinrimoituksen aputeline (Esping 1983)

Kuivauksen aikana tapahtuvien muodonmuutosten välttämiseksi voidaan kieroutumiseen taipuvaisten puiden kuorman päälle laittaa painot. Tarvittava kuormitus riippuu sahatavaran paksuudesta ja leveydestä ja on yleensä 300 - 800 kg/m² kuorman pohjapinta-alaa kohden. Painot vähentävät ennen kaikkea ylimpien sahatavarakerrosten kieroutumista. Alempana kuivauskuormassa olevat puut pysyvät suorina niiden päällä olevien puiden painon vaikutuksesta. Helppokäyttöinen paino on rautamuottiin valettu betonipaino, jossa on alapuolella urat trukin sorkkia varten. Eräs vaihtoehto on tehdä laattoja vanhoista rautatiekiskoista yhteenhitsaamalla.

Painojen tulee olla kuorman päällä niin kauan, että puut ovat jäähtyneet. Painojen käyttö ei valitettavasti suomalaisilla puulajeilla ratkaise muodonmuutosongelmaa kokonaan. Keskimääräinen kierouden väheneminen on melko pientä verrattuna ilman painoja kuivattuihin puihin, sillä painoilla on merkitystä etupäässä kuorman ylimpiin kerroksiin alempien kerrosten suoristuessa päällä olevien puiden painon vaikutuksesta. Lisäksi osa estyneestä kieroutumisesta pyrkii lisäämään muita muodonmuutoksia eli syrjä- ja lapevääryyttä.

3.4 Kuivausvaiheen vaikutus kieroutumiseen

Kaikki muodonmuutokset ovat sitä voimakkaampia, mitä alhaisempaan kosteuteen puu kuivataan. Näin ollen sahatavaraa ei saisi kuivata yhtään kuivemmaksi kuin sen käyttötarkoitus edellyttää. Toinen tärkeä tekijä on sahatavaran pinnan kosteus kuivauksen lopussa. Nopeasti kuivattaessa sahatavaran pinta kuivuu huomattavasti keskikosteutta kuivemmaksi. Pintakerroksella ja sen kutistumisella on suurin kyky muuttaa koko kappaleen muotoa. Näin ollen sahatavaran kosteusgradientin eli pinnan ja keskikohdan välisen kosteuseron tulisi olla mahdollisimman pieni.

Loppukosteustavoitteet

Normaalin kuivauksen jälkeen sahatavaroiden kosteutta voidaan kuvata kuorman keskikosteudella eli eri kappaleiden kosteuksien keskiarvolla sekä kosteuden hajonnalla, kun oletetaan, että kosteus on normaalijakautunut.

Kuivaukselle asetetut kosteusvaatimukset voivat olla esimerkiksi seuraavanlaisia:

1. keskikosteus 16 - 18 %
2. keskikosteus 16 - 18 % ja yhdenkään kappaleen kosteus ei saa olla yli 20 %
3. keskikosteus 16 - 18 % ja kappaleista 5 %:n kosteus saa olla yli 20 %
4. kaikkien kappaleiden kosteuden tulee olla 16 - 18 %.

Ensimmäinen vaihtoehto on helpoin toteuttaa. Kieroutumisen kannalta on edullista kuivata niin, että keskiarvo on mahdollisimman lähellä 18 %:a. Kuivaamalla niin, että hajonta on pieni, vältetään alhaiset kosteudet ja minimoidaan kieroutumisriski. Kun lisäksi toimitaan niin, että pintakin jää mahdollisimman kosteaksi, saavutetaan hyvä tulos.

Toisessa kohdassa pätee sama kuin edellä. Siinä vain hajonnan tulee olla pieni, ettei 20 %:n ylityksiä tule. Jos hajonta sen sijaan on suuri, joudutaan keskikosteutta alentamaan ja kieroutuminen ja liiaksi kierojen kappaleiden osuus lisääntyvät. Ylipäätään sellainen ehto, että yksikään kappale ei saa olla jonkin raja-arvon

ulkopuolella, johtaa joko kohtuuttoman tiukkiin prosessille asetettaviin vaatimuksiin tai sitten koko tuotannon lajitteluun.

Kolmas kohta on edellistä lievempi ja antaa edellistä paremmat mahdollisuudet minimoida kierous.

Neljännän kohdan vaatimus on erittäin kova. Käytännössä tämä ehto on täytettävissä vain mittaamalla kaikkien kappaleiden kosteudet ja poistamalla liian kuivat ja liian kosteat puut. Etuna on, että ylikuivaamista ei sallita, jolloin liian alhaisen kosteuden aiheuttamaa kieroutumista ei synny.

Sahatavarakuorman kosteutta voidaan tasoittaa varsinaisen kuivausvaiheen jälkeisellä tasaannutusvaiheella. Tasaannutuksen ensimmäinen vaihe tapahtuu olosuhteissa, jossa tasapainokosteus on hieman alempi kuin tavoitekosteus, jolloin liian märät kappaleet jatkavat kuivumistaan ja liian kuivien kappaleiden kosteus lisääntyy. Tavoitteena on siis sahatavaroiden välisten kosteuserojen pienentäminen. Tasaannutuksen toisessa vaiheessa nostetaan tasapainokosteutta yli tavoitekosteuden, jolloin kappaleiden pinnan ja keskikohdan välinen kosteusero vähenee.

Loppukosteus, kosteuden hajonta, kosteusgradientti ja pinnan kosteus määräytyvät kuivauskaavan mukaan. Kun kuivauskaava suunnitellaan edellä esitetyt kriteerit huomioonottaen, voidaan kieroutta jonkin verran vähentää.

Kuivauslämpötila

Lämpötilataso yhdessä kosteuden kanssa vaikuttaa siihen, miten paljon puu viruu eli venyy kuormituksen alaisena ollessaan. Kuivausjännitysten vaikutuksesta kuivatavan sahatavaran pinta viruu ainakin tangentin suunnassa alentaen halkeilua aiheuttavia vetojännityksiä. Jos kieroutuminen estetään esim. painojen avulla, ei siitä aiheudu niin suuria muodonmuutoksia ja pituudensuuntaisia jännityksiä, että puu viruisi riittävästi.

Lujuus alenee ja viruminen lisääntyy lämpötilan kasvaessa. Nostettaessa lämpötilatasoa riittävästi voidaan olettaa puun viruvan myös pituuden suunnassa painojen aiheuttamasta jännityksestä johtuen niin, että muodonmuutosviat vähenevät.

Arganbright ym. (1973) tutkivat nuoresta Ponderosa-männystä sahatun tavaran kieroutumista eri lämpötiloissa kuivattaessa. Rimapaketteja oli kuormitettu 1 000 kg/m². Ilmakuivatuilla puilla kierouden väheneminen oli 5 %, lämminilma-kuivauksessa (lämpötila 60 - 76 °C ja märkälämpötila 50 °C) vähennys oli 16 %. Kuumakuivauksessa (100 - 110 °C / 100 °C) kierous väheni 12 %.

4. KUIVAUSKOKEET

Laboratoriokokeet tehtiin pääasiassa VTT:ssä Vanicek-koekuivaamolla, johon mahtuu noin puoli kuutiometriä 1,2 m pitkää sahatavaraa. Porin metsäopiston Kullaalla olevalla VTT:n suurella koekuivaamolla tutkittiin, miten läpisahattujen ja nelisahattujen sahatavaroiden kieroutumien poikkeavat tosistaan. Koesarjat olivat seuraavat:

- kuivauslämpötilan vaikutus kieroutumiseen
- kuivauksessa kieroutuneiden puiden höyrytys painon alaisena
- pienläpimittaisen kuusen keskitavaran kuivaus painon alaisena ja ilman painoja eri kosteuksiin
- kuusen keskitavaran (44 x 150 mm²) kuivaus painon alla oikeakätisesti kierrettynä (kieroutumistaipumuksen vastaisesti)
- nelisahatun ja läpisahatun puun kieroutuminen kuivauksessa.

5. KUIVAUSKOKEIDEN TULOKSET

5.1 Lämpötilatason vaikutus sahatavaran kieroutumiseen

Kuumakuivaustutkimusten yhteydessä (Tarvainen 1994, Tarvainen ym. 1996) tutkittiin eri lämpötilatasojen vaikutusta kieroutumiseen.

Ensimmäisessä koekuivaussarjassa kuivattiin neljä kuormaa 50 x 150 mm²:n mäntyä. Koepuiden pituus oli 120 cm. Puun keskimääräinen alkukosteus oli 50 % ja kuivaustuoretiheyden keskiarvo oli 416 kg/m³. Puut kuivattiin ilman lisäkuormitusta. Kuivauslämpötilat olivat 83, 95, 103 ja 114 °C.

Tulokset on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Muodonmuutokset 50 x 150 mm²:n männyn koekuivauksissa lämpötiloissa 83, 95, 103 ja 114 °C.

T °C	Loppu- kosteus %	Lape- vääryys mm/m	Syrjä-vääryys mm/m	Kierous mm/m	Kuperuus mm/150 mm
83	10,3	0,7	0,3	4,1	1,5
95	9,5	0,5	0,3	3,7	1,5
103	10,5	0,6	0,4	4,1	1,2
114	10,4	0,7	0,3	2,6	1,2

Lämpötilatasolla ei näytä olevan mitään selvää vaikutusta tutkitun mäntysahatavaran muodonmuutoksiin, vaikka kierousarvo onkin pienin korkeimmassa lämpötilassa.

Kuusella tehdyissä kokeissa (Tarvainen 1994) kuivattiin 47 x 150 mm²:n dimensioista sahatavaraa n. 10 %:n kosteuteen lämminilmakuivauksella ja kuumakuivauksella. Toisessa kuumakuivauserässä puut olivat painon alaisia (taulukko 3).

Huolimatta alhaisemmasta kosteudesta oli kierous lämminilmakuivauksen jälkeen vähäisempää kuin kuumakuivauksen jälkeen. Kierouden vaihtelut kappaleiden välillä olivat suuret. Muutama runsaasti kieroutunut puu vaikuttaa ryhmän keskiarvoon voimakkaasti.

Painoilla voidaan tulosten perusteella välttää kappaleiden voimakas kieroutuminen.

Taulukko 3. Kieroutuminen 47 x 150 mm²:n kuusella koekuivauksissa lämpötiloissa 75 ja 110 °C.

	T °C	Loppu- kosteus %	Kosteus- hajonta %	Tiheys kg/m ³	Kierous mm/m/ 150 mm	Kierous hajonta mm/m/ 150 mm	Kier.max. mm/m/ 150 mm
kamarikuivaus	75	9,2	0,9	361	3,7	3,6	15
kuumakuivaus	110	11,3	1,9	348	5,1	6,0	29
kuumakuiv. + painot	110	10,4	1,1	347	3,9	2,6	10

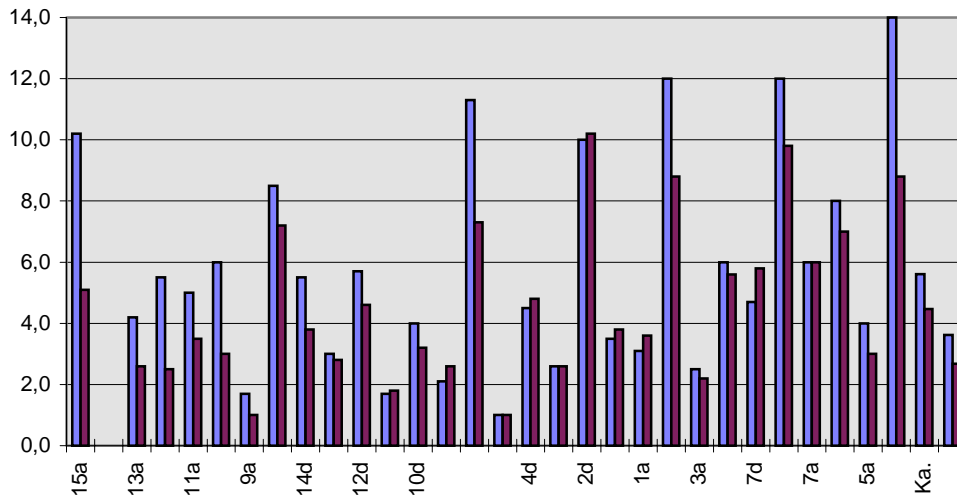
5.2 Kuivauksessa kieroutuneiden puiden höyrytys painon alaisena

Tavoitteena oli selvittää, voidaanko kuivauksen jälkeen voimakkaasti kierojen puiden haitallista muodonmuutosta lieventää jatkokäsittelyllä. Dimensioltaan 50 x 125 mm²:n kuusisoiroja, jotka oli kierouden takia hylätty lajittelussa, rimoitettiin kuivaamoon painojen alle ja lämmitettiin höyryllä n. 70 °C:seen. Kuormitus oli n. 850 kg / m². Puiden keskikosteus ennen höyrytystä oli 17 %.

Puiden keskimääräinen kierous oli yhden metrin matkalla ja koko leveydeltä (125 mm) 5,6 mm ennen käsittelyä ja 4,5 mm käsittelyn jälkeen. Eniten kierous väheni voimakkaimmin kieroutuneissa puissa (kuva 8).

Höyrytyksessä puiden kosteus lisääntyi keskimäärin kaksi prosenttiyksikköä. Kierous väheni osittain puiden pinnan kostumisen takia mutta osittain myös painojen viruttavasta vaikutuksesta. Painojen avulla pystytään eniten kieroihin puihin saamaan suurempi vääntymä (kieroutumisen määrä ennen käsittelyä) ja siten suurempi jännitystila kuin vähän kieroutuneisiin puihin. Tämä selittää osaltaan tehokkaamman kieroutta vähentävän vaikutuksen eniten kieroutuneissa puissa. Sama ilmiö oli havaittavissa kuumakuivauksessa (taulukko 3).

Painon alaisen jälkihöyrytyksen vaikutus on kuitenkin sen verran vähäinen, ettei menetelmää voida pitää kannattavana. Sen sijaan tulokset tukevat sitä näkemystä, että kieroutumiseen taipuvat puut kannattaa joka tapauksessa kuivata painon alaisina tai jollain muulla tavalla kuormitettuna.



Kuva 8. Koepuiden kieroutuminen (mm / 1 m / 125 mm) ennen (vasen pylväs) ja jälkeen (oikea pylväs) höyrytyksen. Kuorman päällä oli painoja 850 kg/m².

5.3 Pieniläpimittaisen kuusen keskitavaran kuivaus painon alaisena ja ilman painoja eri kosteuksiin

Käytännössä kierouden kannalta ongelmallisimmaksi on osoittautunut pienidimensionoinen pienestä tukista sahattu ydinkeskeinen sahatavara.

Laboratoriokuivaimella kuivattiin 30,5 x 85 mm²:n kuusisahatavaraa, joka oli sahattu läpimitaltaan 135 mm:n tukista. Asetteen kolmesta sydäntavarakappaleesta tutkittiin vain keskimmäisten, ydinkeskeisten kappaleiden kieroutumista. Osa puista kuivattiin painon alaisena ja osa kuormittamattomana.

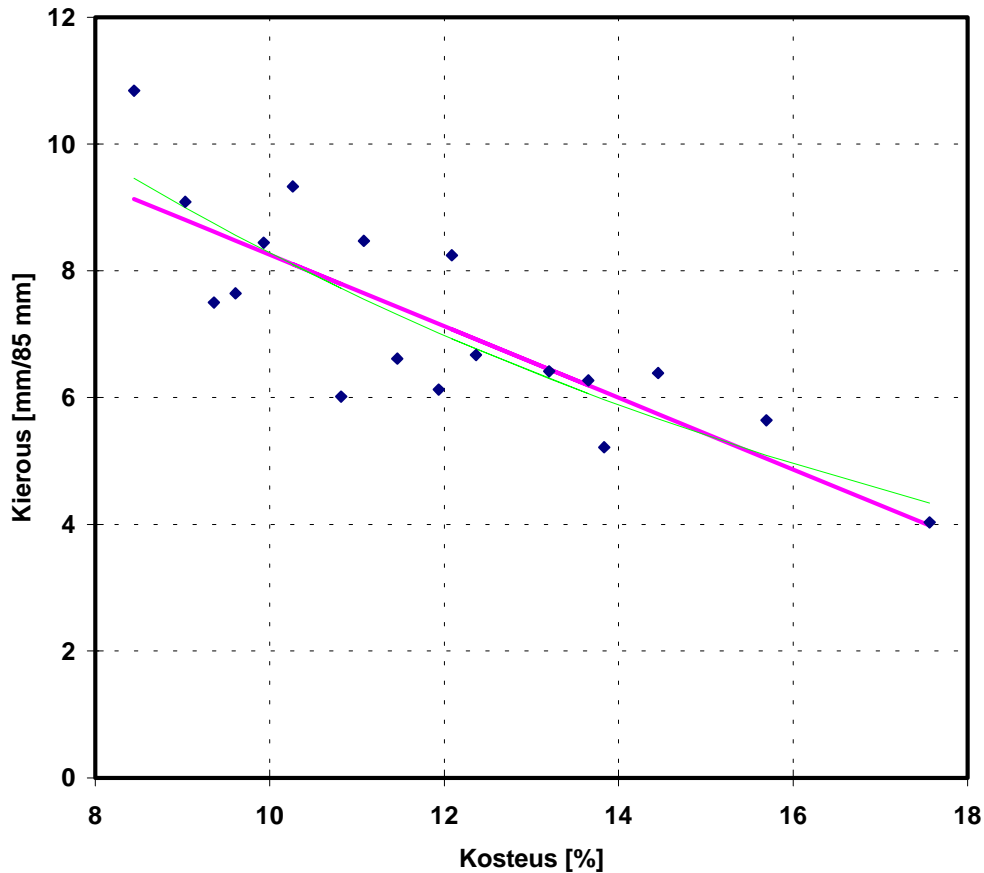
Yhdessä koesarjassa kuivattiin samat puut vaiheittain kolmeen eri kosteuteen. Kullakin kosteustasolla mitattiin puista kieroutuminen ja myös paino kosteuden tarkkaa määrittystä varten. Kieroutumisen riippuvuutta loppukosteudesta esitetään kuvassa 9.

Kolmen koekuivauksen (joista yhdessä kuivattiin edellä esitetysti kolmeen eri kosteuteen) tulosten perusteella laskettiin regressiomalli kierouden riippuvuudelle kosteudesta ja siitä, ovatko puut painon alaisia vai ilman painoja kuivauksessa (kaava 4). Kierous on mitattu yhden metrin matkalla ja 85 mm:n leveydeltä.

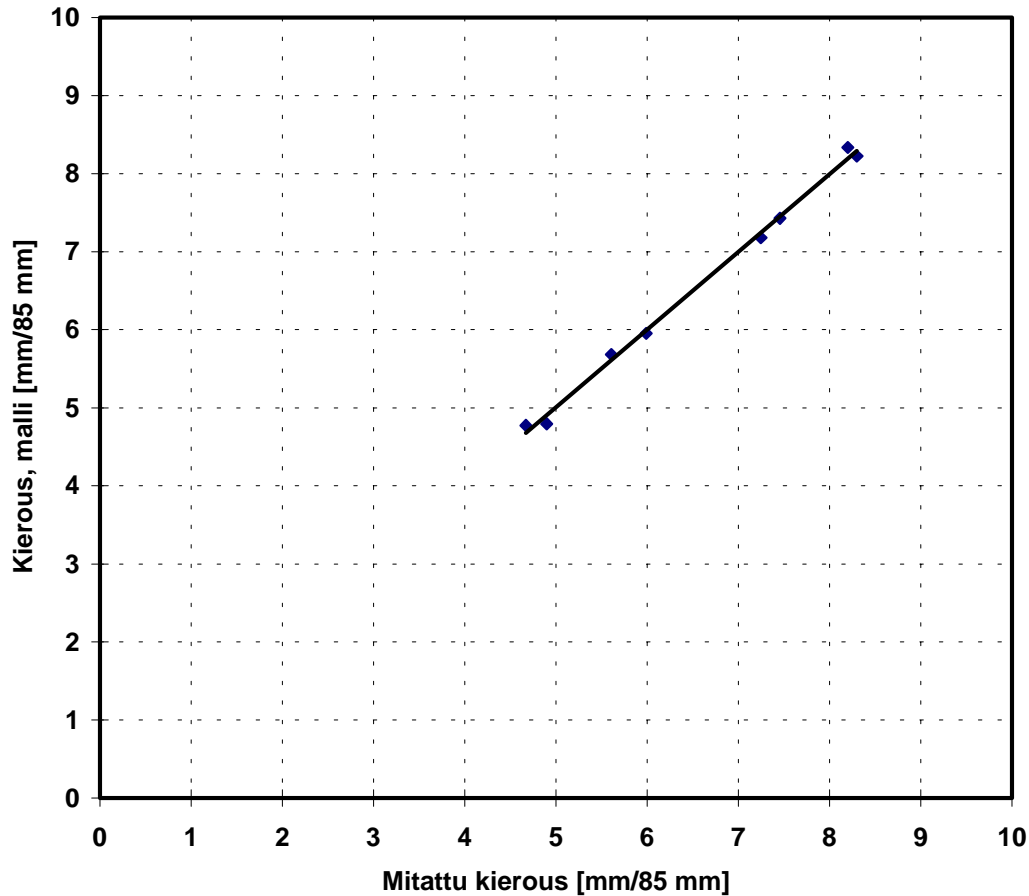
$$\text{Kierous (mm)} = 15,2 - 2,65 P - 0,45 U, \quad (4)$$

missä $P = 1$, jos puiden päällä on painot, ja $P = 0$, jos kuormitusta ei ole
 $U =$ puun kosteus (%).

Mallin selitysaste r^2 on 99,6 %, eli kosteustaso ja kuormitus selittävät kyseisen koesarjan puiden kieroutumisen jokseenkin kokonaan. Regressiomallin mukaisen ja mitatun kierouden yhteys on kuvassa 10.



Kuva 9. Kierouden riippuvuus sahatavaran kosteudesta. Ydinkeskeiset kuusisoivot ($30,5 \times 85 \text{ mm}^2$) mitattiin kuivauksen eri vaiheissa. Mittaustuloksiin on sovitettu sekä lineaarinen että epälineaarinen regressiokäyrä.



Kuva 10. Mitatun ja regressiomallilla lasketun kierouden vastaavuus (ks. teksti).

Regressiomallin mukaan painojen käyttö pienentää kieroutumista keskimäärin 30 %. Korkeissa kuivauskuormissa puiden oma paino kuormittaa alimpia puita niin paljon, että kieroutuminen kuivausvaiheessa estyy. Esimerkiksi 50 mm paksulla tavaralla jo 2 - 3 m korkea kuorma painaa allaan olevia puita riittävällä voimalla.

Mallilla voidaan myös laskea kosteustason vaikuttavan kierouteen siten, että kierous on kyseisellä tavaralla n. 30 % suurempi 12 %:n kosteudessa kuin 16 %:n kosteudessa.

Toisessa kokeessa kuivattiin samoin kuusen ydinkeskeistä 44 x 150 mm²:n sahatavaraa. Kymmenen kappaletta oli ilman painoja ja 15:tä kappaletta oli kuormitettu 850 kg/m². Kuormittamattomien puiden kierous yhden metrin matkalla oli kappaleen koko leveydeltä mitattuna 8,2 mm (hajonta 4,6 mm) välittömästi kuivauksen jälkeen.

Kuormitettujen puiden keskiarvo oli 4,7 mm hajonnan ollessa 1,7 mm välittömästi kuivauksen jälkeen. Näiden puiden kierous lisääntyi lievästi kahdessa vuorokaudessa kuivauksen jälkeen, jolloin keskiarvo oli 5,3 mm ja hajonta 2,2 mm. Tehty koe tukee ensimmäistä koetta ja osoittaa painojen käytön hyödyllisyyden.

Painojen vaikutus on tehokkaimmillaan, kun sahauksen mittatarkkuus on hyvä. Toisin sanoen, kun rimojen väli määräytyy paksuimpien kappaleiden mukaan, voivat ohuet kappaleet jonkin verran kieroutua rimavälissä.

Tehokkain kierouden vähentämiskeino kuivausvaiheessa on kuivata puut asiakkaan haluamaan tavoitekosteuteen siten, että kosteus täyttää tilauksen ehdot, mutta puut ovat kuitenkin mahdollisimman kosteita. Tällainen täsmäkuivaus edellyttää sitä, että kuivaamot toimivat hallitusti ja kuivausolosuhteet ovat niin tasaiset, että loppukosteuden hajonta on pieni. Lisäksi kuivauskaavalla ja etenkin tasaannutusvaiheella voidaan saada loppukosteuden hajonta pieneksi.

5.4 Kuusen keskitavaran (44 x 150 mm²) kuivaus painon alla oikeakätisesti kierrettynä

Painon alla kuivattaessa ei puuhun synny niin suuria syiden suuntaisia voimia, että puun voimakkaasti kutistuvat osat viruisivat niin paljon, että kierous vähenisi merkittävästi. Jos viruttava voima saataisiin suuremmaksi, on oletettavaa, että pituus-kutistumisen eroista johtuvaa kieroutumista saataisiin vähennettyä.

Pieniläpimittaisten puiden syyt ovat normaalisti vasenkierteisiä. Tästä johtuen myös vinosyisyyden aiheuttama kieroutuminen on lähes aina vasenkierteistä. Jos sahatavaroita onnistutaan kuivauksessa pitämään voimakkaasti oikealle kierrettyinä, voidaan olettaa tapahtuvan kieroutta vähentävää virumista. Yksittäisellä sahatavarakappaleella menettely on helposti järjestettävissä, mutta taloudellista ja toimivaa teollisuusmittakaavaista ratkaisua on vaikea löytää.

Laboratoriomittakaavassa kuivattiin pieni kuusisahatavaranippu (44 x 150 mm) siten, että sitä kierrettiin kuorman toisesta päästä vinon aluspuun ja kuormaa vinoon kääntävien vetotankojen avulla.

Puiden kierouden keskiarvo oli kuivauksen jälkeen 2,9 mm yhden metrin matkalla. Saman sahatavaraerän vain painon alla kuivattujen puiden kierous oli 4,7 mm / m / 150 mm.

Tulokset osoittavat, että menettelyllä on mahdollista vähän pienentää kieroutumista. Menetelmän soveltaminen käytäntöön edellyttäisi kuitenkin kuivauslaitteiden kehittämistä.

5.5 Nelisahatun ja läpisahatun puun kieroutuminen kuivauksessa

Kokeessa kuivattiin sekä nelisahattua että läpisahattua pääosin 50 mm paksua sahatavaraa. Tukit (26 kpl) jaettiin sahausmuotojen kesken ominaisuuksiltaan mahdollisimman samanlaisiin ryhmiin.

Paksuudeltaan 50 mm:n sahatavaran mitattu kierous oli 2 m:n matkalla särmäämättömillä 2,3 ja särmätyillä 3,5 prosenttia leveydestä (taulukko 4).

Taulukko 4. Särmäämättömien ja särmätyjen puiden kieroutuminen kuivauksessa.

Sahaustapa		Kierous mm	Mittausleveys mm	Kierous % lev./ 2 m
Läpisahatut	keskiarvo	2,8	142,9	2,3
	hajonta	4,5	51,3	3,3
Nelisahatut	keskiarvo	3,3	98,9	3,5
	hajonta	3,4	18,8	3,6

Vaikka särmäämättömien kuivattujen kappaleiden kierous on lukujen valossa pienempää kuin särmätyjen, mikä vastaa olettamusta, ei pienen sahatavaramäärän ja kierouden suuren hajonnan takia voida vetää varmoja johtopäätöksiä. Särmäämättömät ovat sahanterän koskettaman pinnan osalta yli 40 % leveämpiä kuin särmätyt, joten kaukana ytimestä olevan puuaineksen kieroutumista hillitsevä vaikutus on ilmeistä.

6. YHTEENVETO KESKEISISTÄ TULOKSISTA

Tutkimuksen päätavoite oli löytää keinot vähentää sahatavaran kieroutumista erilaisin kuivausprosessissa tehtävin toimenpitein. Toisena tavoitteena oli mitata tehokkaimmiksi mainittujen menetelmien todelliset kieroutta vähentävät vaikutukset.

Sahatavara kieroutuu epätasaisen pituussuuntaisen kutistuman vaikutuksesta. Pituuskutistuman muuttuessa vain lappelta toiselle siirryttäessä seuraa lapeväääryyttä. Vastaavasti syrjien välinen pituuskutistumaero ilmentyy kuivuvassa puussa syrjäväääryytenä. Kun sen sijaan sahatavaran ristikkäisten kulma-alueiden pituuskutistuma on erilainen, seuraa kieroutumista.

Toinen keskeinen syy kieroutumiseen on puun vinosyisyys. Lisäksi monet paikalliset vikaisuudet, kuten latvamutka ja lyly, aiheuttavat epätasaista pituudensuuntaista kutistumista seurauksena mm. kieroutuminen.

Tehokkain, mutta vain rajallisesti käytettävissä oleva keino on jättää puu niin korkeaan loppukosteuteen kuin tavaran loppukäyttö vain sallii. Tähän yksinkertaiseen toteamukseen sisältyy myös se, että kuivaus ja tasaannutus tulee tehdä niin, että kosteuden hajonta on mahdollisimman pieni. Tällöin keskikosteutta voidaan nostaa ilman, että kosteudelle määritetty yläraja ylittyy. Vielä tärkeämpää on se, että liian kuivien ja keskimäärin eniten kieroutuneiden kappaleiden osuus alenee, kun kosteushajontaa onnistutaan pienentämään. Mittauksissa todettiin pieniläpimittaisen kuusitukin ydinkeskeisen sahatavaran kierouden lisääntyvän 30 %, kun puun kosteus laskee 16 %:sta 12 %:iin.

Kuivauskieroutumista voidaan lieventää kuormittamalla rimapaketteja esimerkiksi metallimuottiin valetuilla betonipainoilla niin, että puun kieroutuminen kuivauksen aikana estyy. Tällöin on tärkeää, että sahatavara on mittatarkkaa. Muutoin ohuet kappaleet pääsevät jonkin verran kiertymään paksuimpien puiden määrittämässä rimojen väleissä. Sahatavaran oma paino riittää painamaan rimapaketissa riittävän suoraksi vasta noin 3 m:ä syvemmällä olevia puita. Tällöin etenkin matalissa kama-reissa painojen käyttö on kannattavaa, mutta korkeissakin kuormissa painoilla voidaan vaikuttaa yli puoleen kuivattavista sahatavaroista. Kieroutumiseen taipuvaisen pieniläpimittaisen kuusen ydinkeskeisen tavaran kieroutta voitiin vähentää 30 % painoja käyttäen. Riittävä rimapaketin päällinen kuorma on n. 600 - 800 kg / m² sahatavaran paksuudesta ja leveydestä riippuen. Kuormitus vaikuttaa eniten voimakkaan kieroutumistaipumuksen omaaviin kappaleisiin.

Kuormitusta tehokkaampi vaikutus saavutetaan kuivaamalla puut mahdollisimman leveänä, mieluiten särmämättömänä. Tällöin kappaleen reuna-alueet estävät kieroutumisen tehokkaasti. Puun pilkkominen vasta kuivauksen jälkeen loppukäytön edellyttämiin kokoihin vähentää selvästi kieroutumista. Koekuivauksessa särmämättömät kieroutuivat särmättyjä vähemmän, joskaan ero ei ollut kovin suuri. Vertailua haittaavat kieroutumisen suuret vaihtelut eri puiden välillä.

Tehtyjen kokeiden mukaan kuivauslämpötila ei olennaisesti vaikuta kieroutumiseen 60 - 120 °C:n lämpötiloissa .

KIRJALLISUUTTA

- Arganbright, D. G., Venturino, J. A., Gorvad, M. 1973. Warp Reduction in Young-Growth Ponderosa Pine Studs Dried by Different Methods with Top-load Restraint. *For. Prod. J.*, vol 23 (8).
- Barrett, J. D., Schniewind, A. P., Taylor, R. L. 1972. Theoretical shrinkage model for wood cell walls. *Wood Sci.* 4(3), s. 178 - 192.
- Boutelje J. B. 1968. Juvenile wood with particular reference to northern spruce. *Svensk Pappertidning* 71(17), s. 581 - 585.
- Choong, E. T. 1969. Moisture and the wood in the southern pines. *For. Prod. J.* 19(2), s. 30 - 36.
- Cotê, W. A. Jr., Day, A .C. 1965. Anatomy and ultrastructure of reaction wood. Teoksessa: Cotê, W. A. Jr. Cellular ultrastructure of woody plants. Syracuse. S. 391 - 481.
- Dahlblom, O., Ormarsson, S., Petersson, H. 1996. Prediction of Deformations in Wood During Drying by an Extended Two-dimensional Formulation. Proceedings of 5th International IUFRO Wood Drying Conference, August 13 - 17, 1996, Quebec City, Canada. Quebec City: Forintek Canada Corporation. S. 69 - 76.
- Esping, B. 1983. How to avoid warp during drying. Stockholm: STFI.
- Esping B. 1988. Trätorkning 2, torkningsfehl - åtgärder. Stockholm: Träteknik-Centrum. 282 s.
- Hakkila, P. 1966. Investigations on the basic density of Finnish pine, spruce and birch wood. Lyhennelmä: Tutkimuksia männyn, kuusen ja koivun puuaineen tiheydestä. *Commu. Inst. For. Fenn.* 61(5), s. 40.
- Hiller, C. H. 1964. Pattern of variation of fibril angle within annual rings of *Pinus attenuata*. *U.S. For. Serv. For. Prod. Lab., Res. Note* 34.
- Kennedy, R. W., Ifju, G. 1962. Applications of microtensile testing to thin wood sections. *Tappi* 45(9), s. 725 - 733.
- Kuusela, J. 1983. Sahatavaran kieroutumisen syyt. VTT:n sisäinen raportti. 4 s.
- Krempl, H. 1970. Untersuchungen über den Drehwuchs bei Fichte. *Mitt. Forstl. Versuchsanstalt Wien* 89, s. 1 - 118.
- Kärkkäinen, M. 1985. Puutiede. Sotkamo: Sallisen kustannus Oy. S. 298.

- McMillin, G. W. 1973. Fibril angle of loblolly pine wood as related to specific gravity, growth rate and distance from pith. *Wood Science and Technology* 7(4), s. 251 - 255.
- Noskowiak, A. F. 1963. Spiral grain in trees ... a review. *Forest Products Journal* 13(7), s. 266 - 275.
- Ollinmaa, P. J. 1959. Reaktiipuututkimuksia. *Acta Forestalia Fennica* 72(1), s. 1 - 54.
- Ormarsson, S. 1995. A finite element study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variations. Lund University, Lund Institute of Technology, Division for Structural Mechanics, Report TVSM-3017. 91 s.
- Ormarsson, S., Dahlblom, O., Petersson, H. 1996. Influence of Annual Ring Orientation on Shape Stability of Sawn Timber. *Proceedings of 5th International IUFRO Wood Drying Conference, August 13 - 17, 1996, Quebec City, Canada.* Quebec City: Forintek Canada Corporation. S. 427 - 436.
- Siimes, F. E. 1938. Suomalaisen mäntypuun rakenteellisista ja fysikaalisista ominaisuuksista. *Puutekniikan tutkimuksen kannatusyhdistys, Julkaisu* 29.
- Tamminen, Z. 1962. Fugtighet, volymvikt m.m. hos ved och bark. I Tall. Rapp. Uppsats. *Instn. Virkeslära Skogshögskolan* 41, s. 1 - 118.
- Tarvainen, V. 1994. Sahatavaran kuumakuivaus. Esiselvitys. Espoo: VTT Julkaisuja 797. 94 s. + liitt. 31 s.
- Tarvainen, V., Forsén, H., Hukka, A. 1996. Männyn ja kuusen kuumakuivauskaavojen kehittäminen ja kuivatun sahatavaran ominaisuudet. Espoo: VTT Julkaisuja 812. 99 s. + liitt. 9 s.
- Vanek, M., Olbrich, R. 1996. Reducing twist during drying: First Results. *Proceedings of 5th International IUFRO Wood Drying Conference, August 13 - 17, 1996, Quebec City, Canada.* Quebec City: Forintek Canada Corporation. S. 297 - 300.
- Viitaniemi, P. 1988. Kuusen kieroutuminen. Espoo: VTT Tutkimuksia 562. 40 s.
- Wormuth E.-W. 1993. Study of relation between flatwise and edgewise modulus of elasticity of sawn timber for the purpose of improving mechanical stress methods. Diploma work, University of Hamburg, Department of Wood Tehnology, Hamburg.
- Zobel, B. J. 1961. Juvelinity in wood production. *Recent Advanc. Bot.*, s. 1663 - 1665.