



LATVIJAS LAUKSAIMNIECĪBAS UNIVERSITĀTE
MEŽA FAKULTĀTE
LATVIA UNIVERSITY OF AGRICULTURE
FOREST FACULTY
DEPARTMENT OF WOOD PROCESSING

Mg.sc.ing. ULDIS GRĪNFELDS

**LATVIJAS KOKU SUGU PIEMĒROTĪBA
SULFĀTCELULOZES RAŽOŠANAI**

**SUITABILITY OF SPECIES OF TREES GROWN IN
LATVIA FOR KRAFT PULP PRODUCTION**

PROMOCIJAS DARBA
kopsavilkums

Inženierzinātņu doktora (Dr.sc.ing.) grāda iegūšanai
Materiālzinātņu nozarē
Koksnes materiālu un tehnoloģijas apakšnozarē

RESUME OF PhD THESIS
for awarding the Scientific Degree Dr.sc.ing.
in Materials science: Wood materials and technology

Jelgava 2012

Darba zinātniskais vadītājs:

Arnis Treimanis.

Academic adviser:

Prof., Dr.habil.sc.ing., Dr.chem.

Darbs izstrādāts Latvijas Lauksaimniecības universitātes Meža fakultātes Kokapstrādes katedrā, sadarbojoties ar Meža un koksnes produktu pētniecības un attīstības institūtu, Latvijas Valsts koksnes ķīmijas institūta Celulozes laboratoriju, LVMI „Silava” un meža pētīšanas stacijām, kā arī ar pētniecības un attīstības institūtu „Innventia” Zviedrijā. Pētījumi veikti laikā no 2002. līdz 2012. gadam.

The Doctoral thesis is performed at the Latvia University of Agriculture, Forest Faculty, Department of Wood Processing, in co-operation with the Forest and Wood Products Research and Development Institute, Cellulose Laboratory of the Latvian State Institute of Wood Chemistry, Latvian State Forestry Research Institute “Silava” and Forest research stations, as well as the research and development company „Innventia”, Sweden. The studies are carried out in the period of time from 2002 to 2012.

Oficiālie recenzenti / *Official reviewers:*

Profesors Dr.habil.sc.ing. **Henn Tuherm;**

Asoc. profesors Dr.chem. **Andris Morozovs;**

Profesors Dr.hab.chem.ing. **Andras Vig,** Budapeštas Tehnoloģijas un ekonomikas universitāte

Darba izstrāde veikta ESF projekta „Ģenētisko faktoru nozīme adaptētīes spējīgu un pēc koksnes īpašībām kvalitatīvu mežaudžu izveidē” ietvaros.

The elaboration of the Doctoral thesis is carried out in the framework of the ESF project “Importance of Genetic Factors in Formation of Forest Stands with High Adaptability and Qualitative Wood Properties”.

Līguma Nr. / *Contract No.*

2009/0200/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/146



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ



Promocijas darba aizstāvēšana notiks LLU promocijas padomes atklātā sēdē 2012. gada 31.augustā plkst. 11:00 LLU Meža fakultātes Kokapstrādes katedrā Jelgavā, Dobeles ielā 41.

The defending of the Doctoral thesis will take place at the public sitting of the Promotion Council on August 31., 2012, at 11:00 a.m., Latvia University of Agriculture, Forest Faculty, Department of Wood Processing in Jelgava, Dobeles iela 41.

Atsauksmes sūtīt: Promocijas padomes sekretāram Profesoram, Dr.sc.ing. A.Drēskam, *Please send the reviews to the Secretary of the Promotion Council, Professor, Dr. sc. ing. A.Drēska,* LLU Meža fakultāte, Akadēmijas iela 11, Jelgava LV 3001 vai / or mfmmezizm@llu.lv.

SATURS

ZINĀTNISKĀ DARBA APROBĀCIJA	4
<i>APPROBATION OF THE SCIENTIFIC WORK</i>	4
1. DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	6
2. PĒTĪJUMA MATERIĀLS UN METODIKA	9
2.1. Koksnes fizikālo un ķīmisko īpašību noteikšana	9
2.2. Sulfātcelulozes fizikālo un ķīmisko īpašību noteikšana	10
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA	12
3.1. Skuju un lapu koku tievkoksnes īpašības	12
3.2. Skuju koku un lapu koku koksnes ķīmiskais sastāvs	14
3.3. Skuju koku un lapu koku sulfātcelulozes īpašības un to ķīmiskais sastāvs	16
3.4. Korelācijas starp tievkoksnes un no tās iegūtās sulfātcelulozes īpašībām	24
3.5. Tievkoksnes izmantošanas sulfātcelulozes ražošanai ekonomiskais novērtējums	27
SECINĀJUMI UN PRIEKŠLIKUMI	29
1. GENERAL CHARACTERIZATION OF THE WORK	32
2. MATERIALS AND METHODS OF THE STUDY	35
2.1. Determining of the physical and chemical properties of wood	35
2.2. Determining of the physical and chemical properties of Kraft pulp	36
3. RESULTS AND DISCUSSION	37
3.1. Properties of coniferous and deciduous trees and pulpwood	37
3.2. Chemical composition of coniferous and deciduous wood	39
3.3. Properties and chemical composition of coniferous and deciduous wood Kraft pulp	41
3.4. Correlations between the properties of pulpwood and the Kraft pulp obtained thereof	45
3.5. Economic assessment of utilizing small diameter trees for Kraft pulp production	47
CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS	49

ZINĀTNISKĀ DARBA APROBĀCIJA
APPROBATION OF THE SCIENTIFIC WORK

Pētījuma rezultāti apkopoti 12 publikācijās, no kurām 3 ievietotas vietējos un 9 - starptautiskajos zinātniskajos izdevumos.

The results of the studies are summarized in 12 publications, 3 of which are published in local and 9 in international scientific editions.

1. Grinfelds U., Skute M., Treimanis A.. Effect of different soil conditions on the composition and properties of pinewood and kraft pulp fibres. Workshop *Cell Wall and Stress*, Reims, France, 30 May - 1 June, 2002, P15.

2. Treimanis A., Grinfelds U., Skute M.. The impact of different forest growth conditions on the composition and properties of the pinewood for pulping. *Chemical technology of wood, pulp and paper*, „Slovak University of Technology”, Bratislava, 2003, 282-286.

3. Grinfelds U., Skute M., Treimanis A. The properties of aspen and pine fibres as a result of different tree growth conditions. Proceedings of the *8th European Workshop on Lignocellulosics and Pulp*, Riga, Latvia, August 22-25, 2004, 365-367.

4. Grinfelds U., Skute M., Treimanis A. The properties of aspen and pine wood fibres as a result of different tree growth conditions. Proceedings of the *International Scientific Conference*, Jelgava, Latvia, 27-28 May, 2005, 68-71.

5. Treimanis A., Grinfelds U., Skute M. Comparative study of wood and pulp fibres obtained from natural forest and plantation aspen trees. Extended abstracts of the *International Symposium on Wood Science and Technology* dedicated to the 50th Anniversary of the Japan Wood Research Society, Yokohama, Japan, 27-30 November, 2005, 8P44.

6. Treimanis A., Grinfelds U., Skute M., Gailis A., Zeps M. Comparative study of wood and pulp fibres obtained from natural forest and plantation aspen fibres. *Proceedings of the 9th European Workshop on Lignocellulosics and Pulp*, Vienna, Austria, August 27-30, 2006, 561-563.

7. Grinfelds U., Skute M., Treimanis A. Identification of fibres origin by characterization of fibre wall polymers, Abstract of *Baltic Polymer Symposium*, September 20 - 22, 2006, Birini, Latvia, p. 30.

8. Treimanis A., Grinfelds U., Skute M. Are the pulp fibre wall surface layers the most resistant ones towards bleaching? Proceedings of the *Italic'4 Conference Materials, Chemicals and Processes from Agricultural and Forest Biomass*, May 8-10, 2007, Rome, Italy, 31-34.

9. Treimanis A., Grinfelds U., Skute M., Dobele G., Sable I. Effects of the forest site on the properties of spruce wood and kraft pulp fibres. *10th European Workshop on Lignocellulosics and Pulp*, Stockholm, Sweden, 26-28 August 2008, 474 - 477.

10. Zeps M., Auzenbaha D., Gailis A., Treimanis A., Grinfelds U., Hibrīdapšu (*Populus tremuloides* x *P.tremula*) klonu salīdzināšana un atlase. *Mežzinātne* 18 (51), 2008, 19 - 34. lpp. (in Latvian)

11. Treimanis A., Grinfelds U., Skute M. Are the pulp fiber wall surface layers the most resistant ones towards bleaching, *Bioresources*, USA, vol. 4(2), 2009, 554-565.

12. Sable I., Grinfelds U., Jansons A., Vikele L., Irbe I., Verovkins A., Treimanis A. Comparison of the properties of wood and pulp fibres from Lodgepole pine (*P.contorta*) and Scots pine (*P.sylvestris*), *Bioresources*, USA, vol. 7(2),2012, 1771-1783.

Pētījuma rezultāti apkopoti 3 zinātnisko projektu pārskatos, kā arī ziņots 2 vietējās un 5 starptautiskajās konferencēs:

The results of the studies are summarized in the reviews of 3 research projects, and are also informed at 2 local and 5 international conferences:

1. May 30 - June 1, 2002, Reims, France. Effect of different soil conditions on the composition and properties of pinewood and kraft pulp fibres. COST E20, Workshop *Cell Wall and Stress*.

2. November 27 - 30, 2005, Yokohama, Japan. Comparative study of wood and pulp fibres obtained from natural forest and plantation aspen trees. *International Symposium on Wood Science and Technology dedicated to the 50th Anniversary of the Japan Wood Research Society*.

3. May 11 - 12, 2006. Riga, Latvia. State-of-art in celer and celerboard fibres recycling in Latvia, *Eco-Balt 2006 Conference*, Riga.

4. April 12 - 13, 2006, Grenoble, France. Eucalyptus Kraft Pulp: Hydromechanical Peeling of Surface Fibre Wall Layers. *COST Action E41 Workshop*.

5. September 20 - 22, 2006. Birini, Latvia. Identification of fibres origin by characterization of fibre wall polymers, *Baltic Polymer Symposium*.

6. June 10-15, 2007, Madison, WI, USA. Behaviour of pulp fiber wall surface layers during enzymatic bleaching. *10th International Congress on Biotechnology in the Pulp and Paper Industry*.

7. April 10 - 11, 2008, Graz, Austria. Hydromechanical peeling of softwood kraft pulp fibres surface layers and investigation of the material obtained. *COST Action E54 5th Management Committee and Working Groups Meeting*.

1. DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Mežā esošie koksnes resursi ir viens no tiem nedaudzajiem resursu veidiem uz zemeslodes, kam piemīt spēja atjaunoties. Saskaņā ar Meža statistiskās inventarizācijas datiem, Latvijā meža zemes aizņem aptuveni 3,8 miljonus hektāru, kas sastāda nedaudz vairāk nekā 56,9 % no valsts teritorijas (Meža statistiskās inventarizācijas 1. cikls (2004. – 2008. g. dati)). Latvijas mežaudzes pārsvarā veido trīs valdošās koku sugas – priede, egļe un bērzs. To audzes kopā aizņem 86 % no visas meža platības. Latvijā pieaug apses un citu lapu koku sugu mežaudžu īpatsvars, jo lauksaimniecības zemes turpina aizaugt ar lapu kokiem, kā arī daļu lauksaimniecībā izmantojamo zemi plānveidīgi apmežo. Bez tam ar lapu koku pioniersugām atjaunojas privāto mežu izcirtumi, kuros nav veikti mākslīgi mežu atjaunošanas pasākumi. Tāpat jāpiemin apses hibridu kā stādāmā materiāla augošā popularitāte, jo tās ātrāk sasniedz ciršanas caurmēru un tām ir lielāka ātraudzība nekā tās „vecākiem” – Parastajai apsei (*P.tremula* L.) un Amerikas apsei (*Populus tremuloides* Michx.).

Latvijas mežos aptuveni 30 % no sagatavotiem apaļkokiem veido tievkoksne, taču tievkoksnes un tās produktu īpašības Latvijā ir pētītas maz. Zināmā mērā tas ir izskaidrojams ar to, ka lielākā daļa tievkoksnes tiek eksportēta kā papīrmalka, kas netiek pārstrādāta Latvijā, un tādēļ šai sortimentu grupai nav pievērsta pietiekama zinātnieku un ražotāju uzmanība. Tas tomēr nav attaisnojums tam, ka ir nepietiekamas zināšanas par liela apjoma (vairāk nekā 3 miljonu m³ gadā) eksporta precī. Turklāt arvien lielāku tievkoksnes daļu, it sevišķi skuju kokus, izmanto Latvijā kā sīkbalžus un izejvielu plātņu un citu kompozīto materiālu ražošanai.

Nav šaubu par to, ka principā Latvijas tievkoksne ir piemērota sulfātcelulozes iegūšanai. Ārvalstu celulozes rūpnīcās, it sevišķi Zviedrijā, sulfātcelulozē pārstrādā aptuveni 3 miljonus m³ Latvijas izcelsmes papīrmalkas un šķeldu katru gadu. Tādās firmās kā „M-real”, „Holmen”, „Domsjö” un citās, no tievkoksnes, kas importēta no Latvijas un citām Baltijas valstīm, iegūst termomehānisko, ķīmiski-termomehānisko papīrmasu un sulfātcelulozi ķīmiskajai pārstrādei (šaujampulvera un šķiedru iegūšanai), taču visvairāk sulfātcelulozi izmanto papīra ražošanai. Taču šī prakse neko daudz neliecina par Latvijas tievkoksnes specifiskām, konkurences cīņā svarīgām īpašībām. Jo, pirmkārt, importētā papīrmalka daudzās Skandināvijas rūpnīcās ir tikai samērā neliela (ap 5 – 15 %) piedeva vietējo izejvielu klāstam, otrkārt, informācijas atgriezeniskā plūsma no papīrmalkas patērētājiem Zviedrijā un citās valstīs ir ļoti skopa un nepilnīga. Līdzīgi kā to dara Ziemeļvalstīs, arī Latvijā mums pašiem ir jānoskaidro savas koksnes īpašības, lai šīs zināšanas izmantotu gan

teorētiskās bagāžas papildināšanai, gan arī praktiski kokmateriālu tirgus apstākļos.

Darba zinātniskā novitāte

Pirmo reizi sistemātiski un kompleksi pētītas Latvijā iegūtās tievkoksnes īpašības un ķīmiskais sastāvs.

Pirmo reizi pētītas Latvijā selekcionēto apses hibrīdu (*Populus tremuloides X Populus tremula*) koksnes un tās sulfātcelulozes īpašības.

Pirmo reizi pētīts Latvijā augušas Klinškalnu priedes (*Pinus contorta*) koksnes ķīmiskais sastāvs un no tās iegūtās sulfātcelulozes īpašības.

Noteiktas likumsakarības (korelācijas) starp tievkoksnes un no tās iegūtās sulfātcelulozes raksturlielumiem.

Pirmo reizi analizēts Latvijā auguša bērza koksnes paraugs ar iekārtu „SilviScan”, atsevišķās gadskārtās nosakot virkni koksnes parametru.

Izstrādāta jauna gadskārtu mērīšanas metodika, kas ieviesta pētniecības procesā LV Koksnes ķīmijas institūtā.

Izstrādāta īpatnējā koksnes patēriņa aprēķināšanas metode koksnes pārstrādes tehnoloģiju salīdzināšanai.

Darba praktiskā nozīmība

Jaunas zināšanas par Latvijas tievkoksnes īpašībām palielina gan meža īpašnieku, gan arī tievkoksnes pārstrādātāju un tirgotāju konkurences spēju. Pašlaik jau daudzas Eiropas celulozes un papīra fabrikas, kā arī daži plātņu ražotāji, seko savu izejvielu – koksnes – izcelsmes vietām, ņemot vērā ne tikai koksnes izcelsmes likumisko pusi, bet arī meža tipu un koku augšanas apstākļus. Līdz ar to, pateicoties pētījumam, mežīpašniekiem ir sniegtas rekomendācijas meža platības atjaunošanā, izvērtējot koku sugu īpašības un to atšķirības.

Demonstrētas jaunu, digitalizētu un automatizētu pētniecības iekārtu („SilviScan 3” un Lorentzen & Wettre „FiberTester”) potenciālās iespējas Latvijas koksnes īpašību noskaidrošanai.

Iegūtie dati par Latvijas tievkoksni un no tās iegūto sulfātcelulozi ir izmantojami augstskolu mācību grāmatās. Šos datus var izmantot arī nākotnē, kad zinātniekiem un praktiķiem būs pastiprināta interese par tievkoksni un tās izmantošanu biorafinērijas, pirolīzes, delignifikācijas un citos procesos.

Pētījuma mērķis

Izvērtēt Latvijā augošu koku sugu piemērotību sulfātcelulozes ražošanai.

Pētnieciskie darba uzdevumi

Noskaidrot dažādos Latvijas reģionos un meža augšanas apstākļos augušo tievkoku fizikālo īpašību un galveno ķīmisko komponentu rādītājus.

Laboratorijas apstākļos iegūt sulfātcelulozi un noskaidrot tai raksturīgos fizikālos un ķīmiskos parametrus.

Noskaidrot iespējamās likumsakarības starp koksnes un sulfātcelulozes parametriem, novērtēt Latvijas tievkoksnes piemērotību sulfātcelulozes ražošanai.

Promocijas darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs ir pakārtots pētījumu uzdevumiem un sastāv no 6 nodaļām:

1. nodaļa. Literatūras apskats par koksnes uzbūvi un ķīmisko sastāvu, kā arī par faktoriem, kas ietekmē to izmaiņas. Aplūkota arī viena no pētnieciskajām metodēm koksnes kompleksajiem pētījumiem, izmantojot iekārtu „SilviScan”.

2. nodaļa. Pētījumā izmantoto materiālu un metožu raksturojums.

3. nodaļa. Pētījuma rezultāti par skuju koku koksni un no tās iegūtās sulfātcelulozes fizikālajām īpašībām un ķīmisko sastāvu, koku sugas un augšanas apstākļu ietekmi uz koksnes un papīrmasas īpašībām.

4. nodaļa. Pētījuma rezultāti par lapu koku koksni un no tās iegūtās sulfātcelulozes fizikālajām īpašībām un ķīmisko sastāvu, kurā noskaidrotas koku sugas un augšanas apstākļu ietekme uz koksnes un papīrmasas īpašībām.

5. nodaļa. ASvarīgāko korelāciju starp tievkoksnes un sulfātcelulozes īpašībām apskats.

6. nodaļa. Tievkoksnes izmantošanas sulfātcelulozes ražošanai ekonomiskais novērtējums, kurā sniegts tievkoku pārstrādes ekonomiskais salīdzinājums, par pamatu ņemot koksnes pieauguma ātrumu un iegūto produktu realizācijas cenu.

Promocijas darba apjomu veido 124 lpp., kurās informācija apkopota 66 attēlos un 32 tabulās. Darbā izmantoti 174 literatūras avoti.

2. PĒTĪJUMA MATERIĀLS UN METODIKA

Promocijas darba uzdevumu realizācijai izmantoti skuju koku un lapu koku paraugkoki no 7 dažādiem Latvijas novadiem un 5 meža augšanas apstākļiem. Sakarā ar lauksaimniecības zemju apmežošanu, izveidoti parauglaukumi arī šajās zemēs. Pētījumā iekļauti Parastās priedes (*P. sylvestris* L.), Parastās egles (*P.abies* L. H.Karst.), Āra bērza (*B.pendula* Roth.), Parastās apses (*P.tremula* L.), Apses hibrīdu (*P.tremuloides* Michx. X *P. tremula* L.) un Klimškalnu priedes (*P.contorta* var. *latifolia* Engelm.) paraugkoki. Kopumā analizēti vairāk nekā 130 paraugkoku.

Koksnes ķīmisko un fizikālo parametru noteikšanu, kā arī sulfātcelulozes iegūšanu un tās raksturojumu veica, izmantojot stumbra daļu augstumā no 0,0 – 1,3 m:

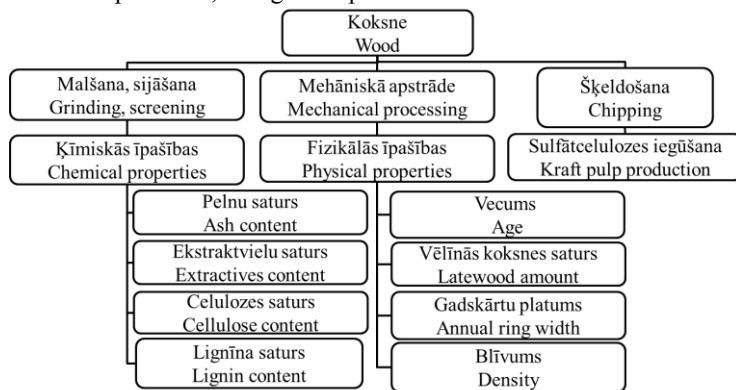
I posms (0 – 0,5 m) izmantots koka vecuma noteikšanai un rezervei;

II posms (0,5 – 1,0 m) izmantots koksnes blīvuma noteikšanai;

III posms (1,0 – 1,3 m) izmantots sulfātvārtījuma iegūšanai, koksnes ķīmisko īpašību, gadskārtu platuma un vēlinās koksnes noteikšanai.

2.1. Koksnes fizikālo un ķīmisko īpašību noteikšana

Koksnes fizikālās īpašības un ķīmisko sastāvu noteica saskaņā ar izstrādāto shēmu (skat. 2.1. att.), kas ir izveidota, balstoties uz TAPPI, DIN, ES standartu prasībām, to loģiskā izpildes secībā.



2.1. att. Koksnes raksturlielumu noteikšanas shēma.

Fig. 2.1. Sheme of determination of wood characteristics.

Koksnes mitrumu nosaka, koksni žāvējot 103 ± 2 °C temperatūrā, saskaņā ar standartu TAPPI 258 om – 94 un DIN 52182 - 1977 prasībām.

Aplievas un kodolkoksnes saturs

Priedes koksni iekrāso ar benzidīna šķīdumu^{1, 2}. Benzidīns, reaģējot ar kodolkoksni, dod sarkanu nokrāsu.

Egles koksnei kodolkoksni no aplievas koksnes atšķir, pielietojot bromkrezolzaļo indikatoru³.

Koksnes blīvumu ρ noteica saskaņā ar DIN 68 364 - 1976 un TAPPI 258 om – 94 standartiem, paraugus kondicionējot normālā klimatā (23 ± 1 °C un $\gamma\%$ 50 ± 2 %) saskaņā ar DIN 50014-20/65-1 standartu.

Koksnes ekstraktvielas noteica pēc standarta TAPPI 204om – 88, lietoja spirta – benzola maisījumu.

Celulozes saturu (pēc Kiršnera - Hoffnera metodes) noteica saskaņā ar standarta TAPPI 203cm – 99 prasībām, 95 % etilspirta (C_2H_5OH) un konc. slāpekļskābes (HNO_3) šķīdumā (4 : 1).

Pelnu daudzuma noteica saskaņā ar standarta TAPPI 211om – 93 prasībām, kā atlikumu pēc koksnes karsēšanas 575 ± 25 °C temperatūrā.

Lignīna saturu noteica saskaņā ar standarta TAPPI 222om - 98 prasībām, Klāsona (sērskābē nešķīstošā) lignīna noteikšana.

Sulfātcelulozi ieguva ar sulfāta vienpakāpes delignifikācijas metodi. Delignifikācijas procesa parametri bija sekojoši: aktīvā sārma koncentrācija vāršķīdumā – $57,4 \text{ g l}^{-1}$ (Na_2O vienībās), sulfiditāte 29,8 %, hidromodulis 4,5 : 1; maksimālā delignifikācijas temperatūra 165 °C, delignifikācijas laiks – 75 min lapu kokiem un 85 min skuju kokiem. Vienam un tam pašam paraugam veica 2 - 4 atkārtotus vārijumus. Delignificēto un izskaloto sulfātcelulozi šķīdēja laboratorijas celulozes dezintegratorā ar ātrumu 4000 min^{-1} , 25 s, atlēja Bihnera piltuvē un žāvēja telpas temperatūrā līdz nemainīgam svaram.

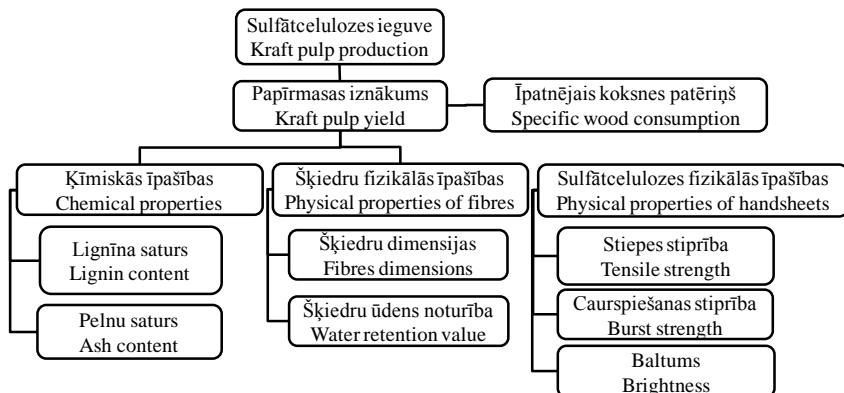
2.2. Sulfātcelulozes fizikālo un ķīmisko īpašību noteikšana

Sulfātcelulozes īpašības noteica saskaņā ar 2.2. attēlā ilustrēto shēmu, kura ir izveidota balstoties, uz TAPPI, DIN, ES standartu prasībām, to loģiskā izpildes secībā. Sulfātcelulozi analizēja, pirms tam to nemaalot, ar nolūku, lai sulfātcelulozes šķiedru pārveidojumi malšanas procesā neradītu sekundārus efektus.

¹ Леньдел П. (1978) Химия и технология целлюлозного производства: Москва, Лесная промышленность, 550 стр.

² Юрченко В.Н. (1985) Основы научных исследований: Ленинград, ЛТА, 150 стр.

³ Sanderman W., Hausen B. (1967) Orientierende versuche zur differenzierung von splint und kern sowie zum sichtbarmachen der ubergangzone von fichte un anderen nadelholzen. Das Papier 21, 349-354.



2.2. att. Sulfātcelulozes analīzes shēma.

Fig. 2.2. Scheme of Kraft pulp analysis.

Sulfātcelulozes ķīmisko sastāvu noteica sekojoši:

Lignīna saturu - tāpat kā koksnei, pēc standarta TAPPI 222om - 98, tikai ņemot lielāku iesvaru – 0,32 - 0,33 g.

Celulozes polimerizācijas pakāpi PP noteica, mērot celulozes – kadoksēna šķīduma viskozitāti +20⁰C temperatūrā, ūdens vannā, saskaņā ar metodiku, kas aprakstīta standartā GOST 25438-82.

Īpatnējo koksnes patēriņu KP_i ($m^3 t^{-1}$), lai iegūtu 1 t sulfātcelulozes, aprēķināja pēc sakarības:

$$KP_i = \frac{1}{I_{pap} \times \rho} \times 10^5,$$

kur ρ – koksnes blīvums, $kg m^{-3}$;
 I_{pap} – papīrmasas iznākums, %.

Sulfātcelulozes šķiedru dimensijas un formu noteica ar automātisko iekārtu Lorentzen&Wettre „FiberTester”.

Šķiedru ūdens noturību noteica saskaņā ar standartu SCAN-C62:00, centrifūgā ar $G = 3000 \pm 20 Nm^2 kg^{-2}$ un centrifugēšanas laiku – 25 min.

Sulfātcelulozi atlēja saskaņā ar standartu ISO 5269/2, izmantojot PTA Rapid-Kothen papīra paraugu atlejamo iekārtu. Atlējumus izgatavoja gramāžas robežās 65 – 80 $g m^{-2}$.

Baltuma pakāpi noteica, izmantojot difūzā baltuma mērīšanas iekārtu (ar $d/0^0$ ģeometriju) Elrepho, saskaņā ar standartu ISO 2470.

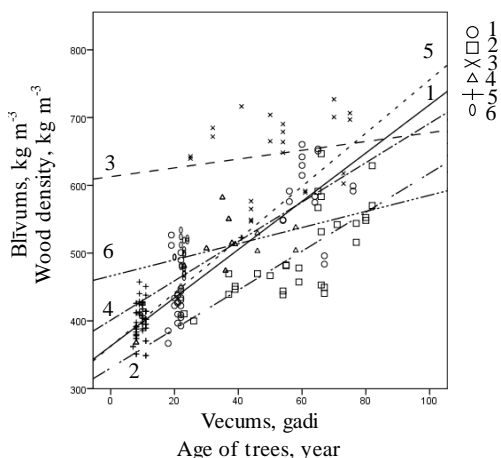
Papīrmasas atlejuma stiepes stiprību noteica saskaņā ar standarta DIN EN ISO 1924-1 prasībām. Papīrmasu salīdzināšanai izmantoja stiepes stiprības indeksu TI ($Nm g^{-1}$), izstiepumu I , trūkšanas garumu BL (m) un stiepes enerģijas absorbciju TEA ($J m^{-2}$).

Papīrmasas caurspiešanas pretestības indeksu noteica saskaņā ar standarta ISO 2758 prasībām.

3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

3.1. Skuju un lapu koku tievkoksnes īpašības

Vismazākais koksnes blīvums vērojams Maltas mežniecībā uz bijušās lauksaimniecības zemes augušajām eglēm ($398 \pm 10 \text{ kg m}^{-3}$), kas ir skaidrojams ar nelielo koku vecumu (25 ± 2 gadi) un mazu vēlinās koksnes procentuālo saturu ($24 \pm 5,0 \%$). Koksnes vecums pozitīvi, cieši korelē ar koksnes blīvumu – Parastā egle – $R^2 = 0,519$; ($p < 0,05$) un Parastā priede – $R^2 = 0,508$ ($p < 0,05$). Klinškalnu priedei šādas korelācijas nav ciešas un būtiskas ($R^2 = 0,023$; $p > 0,05$), kas ir skaidrojams ar pieejamo Klinškalnu priedes koku paraugu viendabīgo koksnes vecumu – 25 ± 2 gadi (skatīt 3.1. att.). Pētījumā iekļautajiem lapu kokiem minētās korelācijas nav ciešas un būtiskas.



3.1.att. Skuju koku un lapu koku vecuma un koksnes blīvuma korelācija.

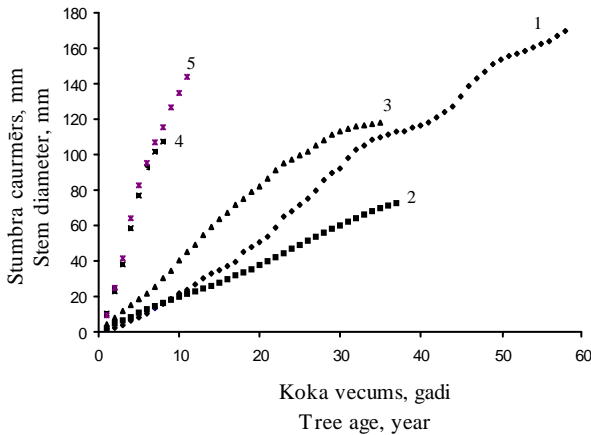
Fig. 3.1. *Corelation between the age and wood density of coniferous and deciduous trees.*

Apzīmējumi / Designations: 1. *P. sylvestris*, $R^2=0,736$; 2. *P. abies*, $R^2=0,603$; 3. *B.pendula*, $R^2=0,033$; 4. *P. tremula*, $R^2=0,456$, 5. *P. tremuloides* X *P. tremula*, $R^2=0,475$; 6. *P. contorta*, $R^2=0,004$.

Koksnes blīvums bērzam noteikts no 607 līdz 677 kg m^{-3} , bet apsēm – robežās no 378 līdz 537 kg m^{-3} . Risinot divu faktoru dispersijas analīzi, secināts, ka meža augšanas apstākļi būtiski ($p < 0,05$) ietekmē koksnes

blīvumu. Lielāks koksnes blīvums bērziem ir vērojams sausieņa meža augšanas apstākļu tipā ($677 \pm 8 \text{ kg m}^{-3}$), savukārt apsei – āreņa meža augšanas tipa mežos ($537 \pm 9 \text{ kg m}^{-3}$). Vismazākais koksnes blīvums ir apses koksnei, kas ir augusi plantāciju tipa mežā, kurā veidojas koksne ar lielu pieaugumu (platām gadskārtām). Pielietojot korelācijas analīzi, noskaidrots, ka nocirsto paraugkoku vecums pozitīvi korelē ar koksnes blīvumu (apsei $R^2 = 0,456$; apses hibrīdiem $R^2 = 0,457$; $p < 0,05$). Bērzam šāda korelācija ir būtiska ($p < 0,05$), bet ir ļoti vāja – $R^2 = 0,033$.

Gadskārtu platuma vērtības atrodas diezgan lielā intervālā: bērzam – no 0,8 līdz 1,2 mm, apses koksnei – no 1,5 līdz 6,8 mm, savukārt, apses hibrīdiem gadskārtu platums ir noteikts 2,6 – 5,9 mm robežās. Arī lapu kokiem tika konstatēta liela koku vecuma izkliede – bērzam – no 41 līdz 63 gadiem, bet apsei – 12 – 47 gadi. Pētījumā tika iekļauti arī 12 gadus veci apses hibrīdi, un kontrolei 41 \pm 3 gadus veci apses hibrīdi. Gadskārtu platums vidēji līdz pat 4 reizēm lielāks ir apšu hibrīdiem un plantācijās augušajām apsēm, salīdzinot ar meža zemēs augušajām apsēm. Tas, savukārt, nozīmē koksnes masas un caurmēra ātrāku pieaugumu šiem kokiem (skat. 3.2. att.), kā arī 3 – 4 reizes īsāku audzes rotācijas laiku.



3.2. att. Apšu un apšu hibrīdu vidējais stumbra caurmēra pieaugums meža zemēs un plantācijās.

Apzīmējumi 1; 2 - apses āreņu mežaudzē; 3 - apses sausieņu mežaudzē; 4 - apses lauksaimniecības zemju plantācijās; 5 - apses hibrīdi lauksaimniecības zemju plantācijās.

Fig. 3.2. Average increment in stem diameter for aspen and aspen hybrids in forest lands and plantations.

Designations: 1; 2 – aspens in the drained mineral soils; 3 – aspens in the dry sites; 4 – aspens in the former agriculture lands; 5 – aspen hybrids in the former agriculture lands.

Koksnes dažādaus pieauguma ātrums nosaka arī koksnes atšķirīgo morfoloģiju – kodolkoksnes saturu, kā arī šķiedru platumu, garumu, sienīņu biezumu. Igaunijā veiktajos¹ pētījumos atrasta būtiska augšņu bagātināšanas ietekme uz kodolkoksnes apjomu. Autors raksta, ka Parastajās priedēs, pieaugot augšņu mēslošanai, samazinās kodolkoksnes īpatsvars. Mūsu pētījums nevar apstiprināt šos pētījumu rezultātus, jo mūsu pētījumā iekļautajām priedēm ir raksturīga pretēja tendence – sausienī augušajām priedēm ir lielāks kodolkoksnes saturs, salīdzinot ar organiskām vielām bagātākās augsnes (ārenis vai kūdrenis) augušajām priedēm. Pētījumā novērots, ka pastāv pozitīva, cieša un būtiska korelācija ($R^2 = 0,711$; $p < 0,05$) starp koksnes vecumu un kodolkoksnes saturu tajā.

Jaunākiem kokiem raksturīgs arī mazāks kodolkoksnes daudzums ($22,5 \pm 5,3$ %), salīdzinot ar vecākiem kokiem (attiecīgi $52,7 \pm 3,4$ % un $47,8 \pm 5,0$ %). Tas sasaucas ar literatūras datiem, ka kodolkoksnes saturs pozitīvi korelē ar koksnes kambiālo vecumu².

3.2. Skuju koku un lapu koku koksnes ķīmiskais sastāvs

Pētot meža augšanas apstākļu ietekmi uz koksnes komponenta - lignīna saturu koksnē, tas ir būtiski ($p < 0,05$) mazāks meža zemēs nekā transformētajā lauksaimniecības zemē augušajiem skuju kokiem. Lignīna saturs Parastās egles tievkoksnes paraugiem atrodas diapazonā no 26,3 līdz 29,5 %, Parastās priedes kokiem – no 26,3 līdz 34,2 %. Lauksaimniecības zemēs augušās Klinškalnu priedes koksnē lignīna saturs ir $26,4 \pm 0,7$ %. Vislielākais lignīna saturs ($29,5 \pm 1,1$ %) vērojams no lauksaimniecības zemes transformētajā mežā augušajām eglēm, turklāt tām konstatēts vismazākais celulozes saturs ($51,0 \pm 1,4$ %). Taču mežaudzēs, kurās pirms tam nav veikta lauksaimnieciskā darbība, nav vērojamas būtiskas atšķirības ($p < 0,05$) lignīna saturā egles koksnei. Tādēļ domājams, ka lignīna un minerālvielu satura atšķirības koksnē ietekmē lauksaimnieciskais mēslojums. Tas atbilst arī literatūras datiem par minerālmēslojuma ietekmi uz kokaugiem: nedaudz samazinās celulozes saturs, pieaug lignīna saturs. Šāda pati tendence pastāv arī priedēm – no lauksaimniecības zemes transformētajās meža zemēs augušām priedēm lignīna saturs ir vislielākais -

¹ Pikk J., Kask R., Peterson P. (2006); The wood quality of fertilized Scots pine (*P. sylvestris* L.) stands on *Vaccinium vitis-idaea* and *Cladonia* site type. Metsanduslikud Uurimused 44, 9–19. ISSN 1406-9954., [tiešsaite] [skatīts 10.11.2011.]. Pieejams: http://mivana.emu.ee/orb.aw/class=file/action=preview/id=270405/mets_44-1.pdf

² Climent J. et al. (2002), Relationship between heartwood radius and early radial growth, tree age, and climate in *Pinus canariensis*, Can. J. For. Res. 32(1): p.p. 103–111.

34,6 ± 1,2 %, salīdzinot ar meža zemju mežaudzēs augušajām priedēm (26,5 ± 1,3 %), pie kam šī starpība ir arī statistiski būtiska ($p < 0,05$).

Savukārt, izvērtējot meža augšanas apstākļu ietekmi uz divu galveno koksnes komponentu sastāvdaļu (lignīna un celulozes saturu koksnē) lapu kokiem, nav vērojamas būtiskas atšķirības. Tomēr saskaņā ar iegūtajiem datiem, meža augšanas apstākļu tips un koksnes suga ietekmē ekstraktvielu un pelnu saturu koksnē, kā arī sulfātcelulozes iznākumu. Būtiski ($p < 0,05$) paaugstināts ir pelnu saturs bijušajās lauksaimniecības zemēs augušiem lapu kokiem, kas skaidrojams ar paaugstinātu minerālelementu saturu augsnē, kas ir palicis no lauksaimnieciskās darbības. Tas var būt traucējošs faktors no šīs koksnes iegūtās sulfātcelulozes balināšanas procesā, pielietojot balināšanas tehnoloģijas ar ūdeņraža peroksīdu kā balinošo aģentu.

Celulozes saturs Parastās priedes koksnē ir noteikts no 48,2 līdz 54,0 %, turklāt būtiski mazāku (par 3,6 %) celulozes saturu koksnē uzrāda priedes, kas augušas bijušajās lauksaimniecības zemēs. Parastajai eglei celulozes saturs koksnē variē no 47,6 līdz 53,9 %. Visvairāk celulozes (53,9 ± 0,6 %) satur egles, kas augušas kūdreņa meža tipā.

Egle, kas augusi slapjainu un kūdreņu mežos, uzrāda lielāku (53,9 ± 0,6 %) celulozes saturu koksnē nekā priede (50,7 ± 0,6 %). Sausieņa mežā augušās priedes uzrāda būtiski ($p < 0,05$) lielāku celulozes saturu koksnē (54,0 ± 1,5 %), salīdzinot ar slapjaini un kūdreni augušajām (attiecīgi 51,3 ± 0,6 % un 50,1 ± 0,9 %). Tas nozīmē, ka potenciāli lielāku celulozes iznākumu var plānot iegūt no sausieņa mežos augušām priedēm, kas arī no mežsaimnieku viedokļa ir piemērotākie augšanas apstākļi priedēm¹ un ko regulē arī LR Ministru kabineta noteikumi Nr. 1453 „Meža atjaunošanas noteikumi”. Mazāks pelnu saturs vērojams Maltas sausieņu meža tipā augušajām eglēm, salīdzinot ar Ieriķu sausieņu mežā augušajām eglēm (attiecīgi 0,23 ± 0,01 % un 0,29 ± 0,02 %). Pretēja tendence vērojama ekstraktvielu saturā, proti, Maltas sausieņu kokiem to ir gandrīz par 60 % vairāk nekā Ieriķu attiecīgajā meža tipā (2,2 ± 0,4 % un 1,3 ± 0,1 %), kas ļauj spriest, ka minerālvielu saturu koksnē ietekmē ne tikai meža tips, bet arī citi faktori (piemēram, ģeogrāfiskais reģions, kurā koks ir audzis, vai ģenētiski noteikts faktors). Savukārt, vislielākais pelnu saturs koksnē vērojams Ieriķu āreņa meža tipā augušajām eglēm un Madonas sausieņu mežos augušajām eglēm, attiecīgi 0,32 ± 0,05 % un 0,33 ± 0,06 %.

Salīdzinot mūsu KĶI Celulozes laboratorijā iegūtos datus ar literatūrā atrodamajiem, tika konstatētas zināmas atšķirības: mūsu pētījumā izmantotie apses koksnes paraugi ir ar lielāku celulozes saturu un mazāku lignīna saturu. Jāatzīmē, ka Latvijā kopumā maz pētīts apses un bērza tievkoksnes ķīmiskais sastāvs, līdz ar to trūkst vietējo, agrāk iegūto datu, ar

¹ Mangalis I. (2004), Meža atjaunošana un ieaudzēšana; Rīga, izdevniecība Et Cetera 453 lpp.

kuriem varētu salīdzināt mūsu pētījuma rezultātus. Āreņa un kūdreņa bērziem ir nedaudz lielāks Kiršnera celulozes saturs ($48,5 \pm 2,3\%$ un $48,7 \pm 0,7\%$), kas pēc sulfāta delignifikācijas pozitīvi atspoguļojās arī sulfātcelulozes iznākumā no koksnes masas vienības ($47,4 \pm 1,3\%$ un $47,1 \pm 0,5\%$, rēķinot uz atlikumu bez lignīna). Būtiski lielāku celulozes saturu koksnē ($p < 0,05$) uzrāda bērzi, kuri auguši lauksaimniecībā izmantotajās zemēs – $49,3 \pm 0,9\%$, salīdzinot ar meža zemēs augušajiem bērziem – $48,7 \pm 0,6\%$, taču jāatzīmē, ka šī starpība ir neliela $\sim 0,6\%$. Lauksaimniecības zemēs augušie bērzi uzrāda būtiski paaugstinātu ekstraktvielu saturu koksnē ($3,1 \pm 0,4\%$), salīdzinot ar meža zemēs augušajiem bērziem, starp kuriem, savukārt, nepastāv būtiskas ($p > 0,05$) ekstraktvielu satura atšķirības.

Apses un apses hibrīdu koksnē celulozes saturs ir lielāks nekā bērza koksnē, turklāt šī starpība ir statistiski būtiska ($p < 0,05$). Praksē šobrīd liela nozīme ir arī apses koksnes termomehāniskās papīrmasas augstajai kvalitātei, un šajā jomā apse ir viena no visvairāk izmantotām koksņēm. Kā vienu no piemēriem var minēt „Estonian Cell”, kas papīrmasas ražošanai izmanto tikai apses koksni

3.3. Skuju koku un lapu koku sulfātcelulozes īpašības un to ķīmiskais sastāvs

Iegūto papīrmasu (sulfātcelulozes) iznākums (ar lignīna saturu tajā) un atlikuma lignīna saturs ir atspoguļoti 3.1. tabulā.

Sulfātcelulozes iznākuma diapazons ir samērā liels – no 43,3 līdz 54,5 %, rēķinot uz absolūti sausu koksnes masu. Egļu sulfātcelulozes iznākumu nav būtiski ietekmējuši meža augšanas apstākļi ($p < 0,05$).

Apses koksnes sulfātcelulozes iznākumi ir lielāki ($p = 0,000$) nekā no bērza koksnes iegūtie. No apses koksnes sulfātcelulozes iznākums ir robežās no 50,3 % līdz pat 58,7 % pie lignīna atlikuma satura 0,8 – 1,4 %, bet no bērza koksnes sulfātcelulozes iznākums ir starp 47,6 % un 48,2 %, lignīna atlikuma saturs ap 2 %.

Ārenī augušajām apsēm ir būtiski ($p < 0,05$) vislielākais – $54,5 \pm 0,8\%$ sulfātcelulozes iznākums, bet vismazākais tas ir no lauksaimniecības transformētajās zemēs augušajām apsēm – $51,6 \pm 1,8\%$. Šāda pati tendence ir raksturīga arī bērziem – lauksaimniecības zemēs augušajiem bērziem sulfātcelulozes iznākums ir nedaudz mazāks ($47,1 \pm 1,5\%$), salīdzinot ar meža zemēs slapjaiņu meža tipā augušajiem bērziem – $47,6 \pm 0,6\%$, kas ir būtiski mazāks rādītājs, ja salīdzina ar sausienī un ārenī augušajiem bērziem – attiecīgi $48,1 \pm 0,8\%$ un $49,0 \pm 1,6\%$.

Sulfātcelulozes iznākums un lignīna saturs
Kraft pulp yield and lignin content

Meža tips / Type of forest	Koku suga / Tree species	Sulfātcelulozes iznākums, %/ Kraft pulp yield, %	Lignīns sulfātcelulozē, %/ Lignin in pulp, %
Sausienis / Dry site	<i>P.sylvestris</i>	49.2 ± 1.6	5.72 ± 0.40
	<i>P.abies</i>	47.7 ± 2.3	4.30 ± 1.11
	<i>B.pendula</i>	48.1 ± 0.8	1.47 ± 0.13
	<i>P.tremula</i>	52.3 ± 1.3	1.12 ± 0.14
	<i>P.contorta</i>	47.5 ± 1.2	6.87 ± 0.66
Slapjainis/ Wet mineral soils	<i>P.sylvestris</i>	49.0 ± 0.6	5.82 ± 0.51
	<i>P.abies</i>	49.6 ± 0.8	6.17 ± 0.36
	<i>B.pendula</i>	47.6 ± 0.6	1.95 ± 0.19
Arenis / Drained mineral soils	<i>P.abies</i>	48.9 ± 1.3	6.07 ± 0.38
	<i>B.pendula</i>	49.0 ± 1.6	1.88 ± 0.08
	<i>P.tremula</i>	54.5 ± 0.8	1.14 ± 0.22
Kūdrenis / Drained peaty soils	<i>P.sylvestris</i>	47.6 ± 1.3	6.14 ± 0.36
	<i>P.abies</i>	49.9 ± 0.6	5.63 ± 0.10
	<i>B.pendula</i>	47.9 ± 2.4	1.91 ± 0.53
Sausienis L/z/ Former agriculture lands	<i>P.sylvestris</i>	45.7 ± 1.6	7.71 ± 0.56
	<i>P.abies</i>	44.9 ± 5.7	3.93 ± 0.29
	<i>B.pendula</i>	47.1 ± 1.5	1.99 ± 0.53
	<i>P.tremula</i>	51.6 ± 1.8	1.34 ± 0.27
	<i>P.tremuloides X P. tremula</i>	51.7 ± 3.0	1.26 ± 0.30

Izmantojot jaunas pētniecības iekārtas, šajā gadījumā, digitālo šķiedru dimensiju mēriekārtu „FiberTester”, ir iespējams ātri un kvalitatīvi noteikt šķiedru dimensiju parametrus (garumu, platumu, formu, raupjumu; skat. 3.2. tabulu). Noteikts, ka Parastās priedes paraugkoku sulfātcelulozes šķiedru vidēji svērtais garums ir $2,53 \pm 0,04$ mm, bet egles $2,41 \pm 0,03$ mm, un šīs atšķirības ir būtiskas ($p < 0,05$). Bērza sulfātcelulozes šķiedru vidēji svērtie garumi visiem paraugiem ir $0,98$ līdz $1,06$ mm robežās, bet mežā augušajām apsēm no $0,80$ līdz $0,94$ mm. Bijušajās lauksaimniecības zemēs augušās apses uzrāda būtiski ($p < 0,05$) mazāku šķiedru garumu, savukārt, šķiedru platums būtiski ($p > 0,05$) neatšķiras no meža zemēs augušo apšu šķiedru platumā, kas būtu skaidrojams ar koku vecuma atšķirībām.

Vēl jāatzīmē, ka gan bērza, gan apses sulfātcelulozes šķiedras ir garākas nekā eikalīpta sulfātcelulozei ($0,80 \pm 0,01$ mm). Tas nozīmē, ka Latvijā augušu lapu koku sulfātcelulozes kvalitāte un konkurētspēja ir potenciāli lielāka. Protams, jāņem vērā arī kvalitātes un cenas attiecība, kas visumā ir par labu ražotājiem, kuri ģeogrāfiski novietoti vairāk uz dienvidiem, jo eikalīpti ir ātraudzīgi un Ziemeļu puslodē esošie koki nespēj ar tiem konkurēt.

Sulfātelulozes šķiedru dimensiju mērījumi
Measurements of kraft pulp fibres

Meža augšanas apstākļu tips / Type of forest	Koku suga / Tree species	Šķiedru garums, mm / Fibre length, mm	Šķiedru platums, um / Fibre width, um	Šķiedru forma, % / Fibre form, %	Raupjums, ug 100m ⁻¹ / Coarseness, ug 100m ⁻¹
Sausienis / Dry site	<i>P. sylvestris</i>	2.62 ± 0.16	33.3 ± 1.0	93.4 ± 0.5	187.4 ± 14.1
	<i>P. abies</i>	2.33 ± 0.27	27.4 ± 0.8	92.3 ± 1.3	130.6 ± 13.4
	<i>B. pendula</i>	0.99 ± 0.02	21.0 ± 0.1	96.0 ± 0.0	76.1 ± 2.4
	<i>P. tremula</i>	0.78 ± 0.07	21.7 ± 1.0	95.4 ± 0.2	74.3 ± 9.6
	<i>P. contorta</i>	2.29 ± 0.11	31.8 ± 2.2	93.2 ± 1.0	175.3 ± 34.7
Slapjainis / Wet mineral soils	<i>P. sylvestris</i>	2.67 ± 0.17	33.4 ± 0.4	93.2 ± 0.5	195.8 ± 13.2
	<i>P. abies</i>	2.80 ± 0.06	27.4 ± 0.7	91.1 ± 0.5	145.8 ± 5.1
	<i>B. pendula</i>	1.01 ± 0.12	21.6 ± 0.3	95.7 ± 0.1	75.8 ± 2.9
Ārenis / Drained mineral soils	<i>P. abies</i>	2.37 ± 0.13	25.3 ± 0.8	90.8 ± 0.5	117.7 ± 14.2
	<i>B. pendula</i>	0.98 ± 0.01	21.8 ± 0.3	95.9 ± 0.2	81.5 ± 1.3
	<i>P. tremula</i>	0.95 ± 0.04	22.2 ± 0.4	95.4 ± 0.2	83.8 ± 9.6
Kūdrēnis / Drained peaty soils	<i>P. sylvestris</i>	2.29 ± 0.26	30.8 ± 0.5	93.5 ± 0.2	153.4 ± 10.4
	<i>P. abies</i>	2.58 ± 0.12	28.6 ± 1.5	91.7 ± 0.7	144.3 ± 12.3
	<i>B. pendula</i>	1.06 ± 0.06	21.5 ± 0.8	95.8 ± 0.2	79.6 ± 8.0
Sausienis L/z / Former agriculture lands	<i>P. sylvestris</i>	2.16 ± 0.19	34.0 ± 2.0	93.6 ± 0.9	173.3 ± 26.6
	<i>P. abies</i>	2.13 ± 0.13	27.9 ± 1.9	93.0 ± 1.9	127.2 ± 19.1
	<i>B. pendula</i>	1.09 ± 0.07	21.8 ± 0.6	94.7 ± 0.8	91.4 ± 6.6
	<i>P. tremula</i>	0.76 ± 0.05	21.7 ± 0.6	94.8 ± 0.7	75.5 ± 9.2
	<i>P. tremuloides</i> X <i>P. tremula</i>	0.80 ± 0.14	21.4 ± 0.6	94.8 ± 0.7	72.1 ± 14.4

Iespējams, ka nākotnē ar eikalīptu koksni labi varētu konkurēt Latvijā audzētie apses hibrīdi, kuri jau tagad uzrāda labus augšanas ātrumus, tieša - ļoti labi sagatavotās augsnēs^{1, 2}, bet ar selekcijas metodēm nākotnē ir iespējams iegūt tādas apses hibrīdu klonus, kas tirgū šķiedru īpašību ziņā būtu līdzvērtīgi eikalīptiem.

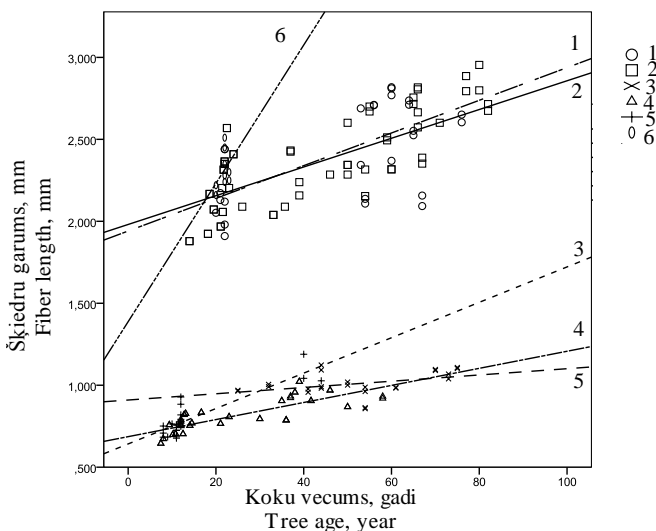
Tā kā sulfāta delignifikācija būtiski neietekmē šķiedru ģeometriskos parametrus, tad, analizējot to atšķirības, var spriest par meža augšanas apstākļu ietekmi. Parastās priedes šķiedru garums Ieriķu sausieņu un slapjainu mežu tipos būtiski ($p > 0,05$) neatšķiras (attiecīgi $2,62 \pm 0,07$ mm un $2,67 \pm 0,07$ mm). Savukārt, būtiski ($p < 0,05$) mazāki ir kūdrēnī augušās

¹ Gailis A. (2005) Apses selekcijas pētījumi kvalitātīvas koksnes izaudzēšanai: Silava, Latvija. [tiešsaite] [skatīts 10.11.2011.]. Pieejams: http://www.lvm.lv/files/text/apstes_selkcija.pdf

² Daugaviete M. (2004) Koku sugu un augsnis sagatavošanas veida izvēle dažādu lauksaimniecības augšņu apmežošanai, Faktu lapa LVMI "Silava".

Parastās priedes šķiedru garumi un platumi (attiecīgi $2,29 \pm 0,07$ mm un $30,8 \pm 0,3$ μm). Sausieņa meža tipā augušajām eglēm īsākās ($2,33 \pm 0,27$ mm) šķiedras ir tiem kokiem, kas ir auguši uz 20. gs. 70-jos gados transformētās lauksaimniecības zemes.

Domājams, ka tas ir koku nelielā vecuma dēļ, un tādēļ koksne ir proporcionāli liela jaunilās koksnes daļa. Kā norāda literatūras avoti¹, tieši jaunilai koksnei raksturīgas īsākas koksnes šķiedras nekā briedumkoksnei. Salīdzinot datus ar literatūrā esošajiem, izskaidrojums, kāpēc ir tik zemi šķiedru fizikālie rādītāji, ir koka mazais vecums (10 gadi), kura laikā ir izveidojusies jaunilā koksne ar zemiem šķiedru dimensiju rādītājiem. Promocijas darba autors uzskata, ka šķiedru fizikālie rādītāji ir cieši saistīti ar kambija pārkoksnešanās procesiem un koksnes vecumu, t.i., šķiedru garums pieaug strauji, bet ne lineāri koka jaunilajā augšanas periodā, un visstraujāk pieaug līdz ar koksnes briedumu. Mūsu pētījumā, kurā ir iekļautas vairākas koku sugas ar dažādiem vecumiem, ir iespējams veikt koku vecuma un delignificētās koksnes šķiedru garuma korelācijas analīzi.



3.3. att. **Koku vecuma un šķiedru vidēji svērtā garuma korelācija.**
Fig. 3.3. Correlation between the tree age and fibre weighed average length.

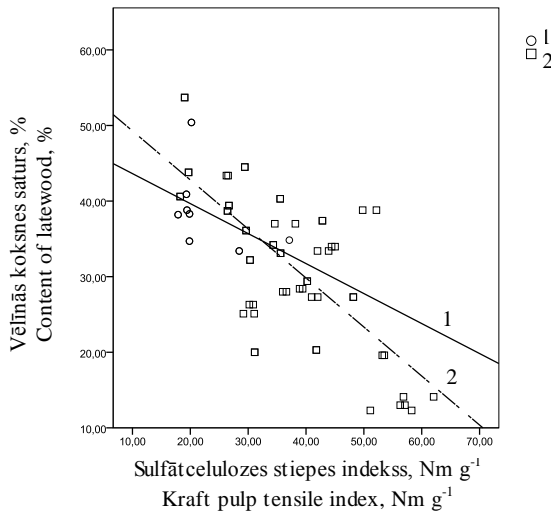
Apzīmējumi / Designations: 1. *P. sylvestris*, $R^2=0,348$; 2. *P. abies*, $R^2=0,596$; 3. *B.pendula*, $R^2=0,177$; 4. *P. tremula*, $R^2=0,651$, 5. *P. tremuloides* x *P. tremula*, $R^2=0,77$; 6. *P. contorta*, $R^2=0,168$.

¹ Lundqvist S.O. (2003) The EuroFiber Project objectives, layout and general results: EuroFiber seminar, STFI, Sweden

3.3. attēlā redzamā korelācija parāda, ka pastāv vidēji cieša sakarība starp šiem rādītājiem atsevišķām koku sugām – Parastajai eglei ($R^2 = 0,596$; $p < 0,05$), Parastajai apsei ($R^2 = 0,651$; $p < 0,05$), apses hibrīdam ($R^2 = 0,773$; $p < 0,05$), respektīvi, vecākiem kokiem izveidojas relatīvi garākas šķiedras. Savukārt, pārējām pētījumā iekļautajām koku sugām šādas korelācijas nav būtiskas, kā arī nav ciešas ($R^2 = 0,01$; $p > 0,05$).

Pētot vēlinās koksnes ietekmi uz sulfātcelulozes atlējuma stiepes stiprību, var novērot (skat. 3.4. att.), ka, pieaugot vēlinās koksnes šķiedru daudzumam koksnē un līdz ar to arī no tās iegūtajā sulfātcelulozē, samazinās sulfātcelulozes stiepes stiprība ($R^2 = 0,30$, $p < 0,05$), acīmredzot, koksnes vēlino šķiedru biezo sienīņu dēļ, kas samazina šķiedru elastību un saistīšanās spēju (šķiedru saskarsmes laukumu, 3.5. att.).

Konstatējot vēlinās koksnes īpatnējā satura izmaiņas, pieaugot koka vecumam, un vēlinās koksnes negatīvo ietekmi uz gatavā produkta – papīrmasas stiepes stiprību, var secināt, ka mehāniski stipras papīrmasas var iegūt no jaunākiem kokiem, kuri ir arī ātraudzīgāki, ar mazu vēlinās koksnes saturu.



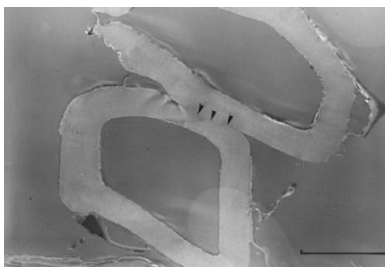
3.4.att. Vēlinās koksnes un sulfātcelulozes stiepes indeksa korelācija.

Fig. 3.4. Correlation of latewood and kraft pulp tensile index.

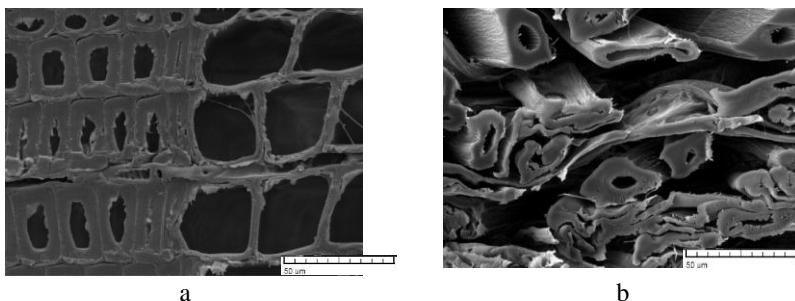
Apzīmējumi / Designations: 1 *P. sylvestris*, $R^2=0,162$; 2 *P. abies*, $R^2=0,617$.

To var ļoti labi novērot elektronu skenējošā mikroskopijā (SEM), kur redzams, ka agrīnās koksnes šķiedras pēc delignifikācijas sakļaujas (saspiežas), zaudējot sākotnējo formu, un labi saistās viena ar otru, turpretī

vēlīnās koksnes šķiedras savu formu maina maz un slikti saistās ar citām papīrmasā esošām šķiedrām (3.6. att.).



3.5. att. Šķiedru saskarsmes vieta¹.
Fig. 3.5. Fibre bonding area¹.



3.6. att. Egles koksnes (a) un no tās iegūtā papīra (b) šķērsriezumu SEM attēli.

Fig. 3.6. SEM images of the cross-sections of spruce wood (a) and the paper obtained thereof.

Jāatzīmē, ka koka sugai, augšanas apstākļiem un šķiedru raksturojumam ir būtiska loma celulozes ražošanā. Piemēram, šķiedras ar biežākām sieniņām ir vairāk pakļautas mehāniskiem bojājumiem nekā šķiedras ar plānākām sieniņām, kas ir elastīgākas². Tāpat var apgalvot, ka, pieaugot vēlīnās koksnes īpatsvaram sulfātcelulozes šķiedru masā, pieaug arī enerģijas patēriņš šķiedras maļot, lai tās malšanas procesā padarītu

¹ Ragauskas A.J. (2008) Fiber Modification; Kraft-TMP Bonding , lecture, [tiešsaite] [skatīts 10.11.2011.]. Pieejams: http://www.ipst.gatech.edu/faculty/ragauskas_art/technical_reviews/Fiber%20Bonding%20presentation.pdf

² Nyholm K., Ander P., Bardage S., Daniel G. (2001) Dislocation in pulp fibres – their origin, characteristics and importance – a review: Nordic Pulp and Celer Research Journal, 16 (2001) 4, pp. 376- 384.

elastīgākas (saspiestu šķiedru lumenu). Skatoties no kvalitatīva rakstāmpapīra ražošanas viedokļa, nav vēlams liels vēlinās koksnes šķiedru saturs tajā. Tāpat svarīgi ir nepieļaut vēlinās koksnes šķiedrām nokļūt papīra virsējos slāņos, jo tādejādi tiek palielināts papīra virsmas raupjums un samazināta tintes vai krāsas uzsūktspēja (papīra apdrukāšanas rezultātā var tikt radīts brāķis – krāsa neuzklāšies ar vienādu intensitāti). To panāk ar vairākslāņu papīra ražošanas un papīra pārklāšanas tehnoloģijām. Tādēļ arī ekonomiski izdevīgāk būtu ražot celulozi un papīru no koksnes, kurā ir mazs vēlinās koksnes saturs.

Visu pētījumā iekļauto koku sugu papīrmasas mehānisko stiprību un baltumu mērījumi atainoti 3.3. tabulā, kurā redzams, ka nebalinātai skuju koku sulfātcelulozei ir augstāka stiepes un caurspiešanas stiprība, turpretī papīrmasas baltums ir būtiski zemāks.

3.3. tabula / Table 3.3.

Nemaltas sulfātcelulozes atlējumu mehāniskās un optiskās īpašības
Mechanical and optical properties of unbeaten Kraft pulp handsheets

Meža tips / Forest type	Koka suga / Tree species	Stiepes indekss, Nm g ⁻¹ / Tensile index, Nm g ⁻¹	Caurspiešanas indekss, kPa m ² g ⁻¹ / Burstindex, kPa m ² g ⁻¹	Papīrmasas baltums, ISO % / Brightness, ISO %
Sausienis / Dry site	<i>P.sylvestris</i>	19 ± 1	0.68 ± 0.07	36.0 ± 0.8
	<i>P.abies</i>	35 ± 9	1.62 ± 0.60	38.1 ± 1.7
	<i>B.pendula</i>	17 ± 2	0.51 ± 0.02	39.0 ± 3.4
	<i>P.tremula</i>	26 ± 3	0.72 ± 0.13	51.2 ± 0.2
Slapjainis / Wet mineral soils	<i>P.sylvestris</i>	18 ± 1	0.63 ± 0.04	29.9 ± 0.8
	<i>P.abies</i>	22 ± 5	0.84 ± 0.25	36.9 ± 0.4
	<i>B.pendula</i>	18 ± 1	0.52 ± 0.04	36.7 ± 1.3
Ārenis / Drained mineral soils	<i>P.abies</i>	28 ± 1	1.19 ± 0.14	30.9 ± 0.8
	<i>B.pendula</i>	13 ± 2	0.50 ± 0.02	38.9 ± 4.1
	<i>P.tremula</i>	19 ± 5	0.56 ± 0.04	47.7 ± 3.3
Kūdreņis / Drained peaty soils	<i>P.sylvestris</i>	22 ± 4	0.77 ± 0.21	31.4 ± 1.0
	<i>P.abies</i>	26 ± 4	1.02 ± 0.20	34.1 ± 1.8
	<i>B.pendula</i>	14 ± 5	0.50 ± 0.01	39.1 ± 2.8
Sausienis L/z / Former agriculture lands	<i>P.sylvestris</i>	37 ± 2	1.85 ± 0.03	30.4 ± 3.5
	<i>P.abies</i>	47 ± 9	2.56 ± 0.87	40.6 ± 0.3
	<i>B.pendula</i>	23 ± 3	0.72 ± 0.13	38.2 ± 1.2
	<i>P.tremula</i>	30 ± 6	0.88 ± 0.25	53.4 ± 0.8
	<i>P. tremuloides</i> X <i>P. tremula</i>	29 ± 5	0.82 ± 0.16	51.5 ± 2.0

Sausieņu un bijušajās lauksaimniecības zemēs augušās apses un apses hibrīdu sulfātcelulozes uzrāda lielākus ($p < 0,05$) mehāniskās stiprības rādītājus nekā āreņu mežos augušie paraugkoki. Ārenī augušās apses

sulfātceluloze uzrāda ne tikai zemu mehāniskos rādītājus, bet arī vismazāko baltuma pakāpi ($44,6 \pm 0,7$ %). Savukārt, sulfātceluloze, kas iegūta no lauksaimniecības zemēs augušajām apsēm, uzrāda augstu baltuma pakāpi ($53,4 \pm 0,8$ %) un arī ļoti augstus rādītājus stiepes stiprībā ($30,0 \pm 6,9 \text{ Nm g}^{-1}$) un caurspiešanas stiprībā ($0,88 \pm 0,25 \text{ kPa m}^2 \text{ g}^{-1}$), kas ir lielāki par sulfātcelulozes mehāniskajiem rādītājiem, kas iegūti no sausienī, slapjainī, kūdrenī augušām priedēm. Plantācijā augušo bērzu sulfātcelulozes stiepes indekss $23,7 \pm 3,4 \text{ Nm g}^{-1}$ un caurspiešanas indekss $-0,72 \pm 0,13 \text{ kPa m}^2 \text{ g}^{-1}$, salīdzinot ar meža zemēs augušo bērzu papīrmasas mehāniskās stiprības rādītājiem. Turklāt jāatzīmē, ka mehāniskās stiprības pieaugums, attiecīgi, ir par 12 un 26 %, kas ir ļoti nozīmīga starpība papīru ražošanas industrijā. Ārenī augušo bērzu sulfātceluloze uzrāda viszemākos mehāniskos rādītājus (stiepes indekss $13,6 \pm 2,3 \text{ Nm g}^{-1}$ un caurspiešanas indekss $-0,52 \pm 0,02 \text{ kPa m}^2 \text{ g}^{-1}$). Vēlētos atzīmēt, ka ārenī un kūdrenī augušo bērzu sulfātcelulozes uzrāda būtiski ($p < 0,05$) vismazākos sulfātcelulozes stiepes indeksus pie vieniem un tiem pašiem caurspiešanas indeksu rezultātiem. Domājams, ka tas ir šķiedru slaiduma dēļ, jo bērzi, kuri auguši kūdreņa meža tipā, uzrāda vislielāko šķiedru slaidumu ($49 \pm 4 \text{ mm mm}^{-1}$) un šķiedru raupjumu ($79,6 \pm 8,0 \text{ mg m}^{-1}$). Tas zināmā mērā sasaucas ar Horna pētījumiem¹, kuros, pielietojot multiplās regresijas analīzi, ieguva šķiedru garuma L un atlietā papīra caurspiešanas stiprības X regresijas vienādojumu:

$$X = -18,94 + 37,50 * L (R^2 = 0,694).$$

Pētot bērza, apses un apses hibrīda šķiedru garumu un caurspiešanas stiprību, tika iegūti sekojoši regresijas vienādojumi:

$$X_B = -0,167 + 0,735 L (R^2 = 0,204, p < 0,05);$$

$$X_A = 1,705 - 1,132 L (R^2 = 0,176, p < 0,05);$$

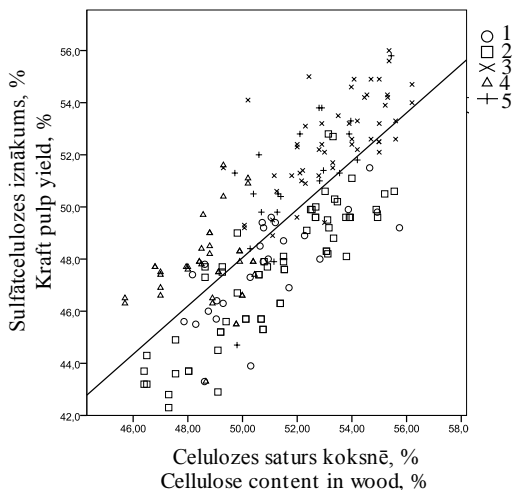
$$X_{HA} = 1,223 - 0,518 L (R^2 = 0,008, p < 0,05).$$

Salīdzinot iegūtās sakarības ar Horna iegūto, var secināt, ka atšķirīgām koku sugām šķiedru garuma ietekme uz caurspiešanas stiprību ir dažāda. Pieaugot šķiedru garumam, bērza papīrmasas caurspiešanas stiprība palielinās, savukārt, apsei un apses hibrīdu papīrmasai caurspiešanas stiprība samazinās. No iegūtajiem vienādojumiem var secināt, ka mūsu pētījumā iegūtās sakarības ir būtiskas, taču tās nav tik ciešas, kā Horna iegūtais vienādojums. Domājams, ka tas ir mūsu pētījumā iekļautās lielās paraugkopas dēļ, jo Horns savos pētījumos ir pētījis vairākas koku sugas, taču ar mazāku atkārtotumu skaitu.

¹ Horn A.R.(1978) Morphology of pulp fiber from hardwoods and influence on celer strength: Forest products laboratory, forest service, U.S. department of agriculture, Madison. [tiešsaite] [skatīts 10.11.2011.]. Pieejams: www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrp/fplrp312.pdf

3.4. Korelācijas starp tievkoksnes un no tās iegūtās sulfātcelulozes īpašībām

Pieaugot lignīna saturam koksnē, samazinās celulozes saturs koksnē un līdz ar to arī sulfāta delignifikācijas procesā lietderīgi iegūtais sulfātcelulozes iznākums. Sulfātcelulozes iznākums ir mazāks par analītiski nosakāmo Kiršnera celulozes saturu, sakarā ar tās destrukciju delignifikācijas procesā, un visām pētījumā iekļautajām sugām celulozes destrukcija notiek līdzīgi (2 – 4 %), kas atspoguļots 3.7. attēlā.



3.7. att. Kiršnera celulozes satura koksnē un sulfātcelulozes iznākuma korelācija.

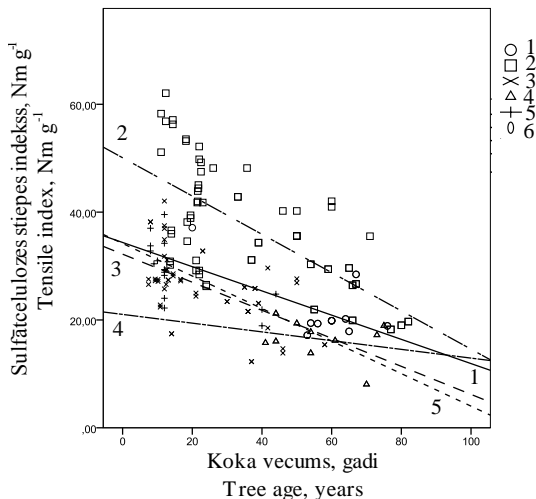
Fig. 3.7. Correlation of Kuerschner cellulose content in wood and Kraft pulp yield.

Apzīmējumi / Designations: 1. *P. sylvestris*; 2. *P. abies*; 3. *B. pendula*; 4. *P. tremula*; 5. *P. tremuloides* X *P. tremula*; $R^2 = 0.580$.

Pētot koksnes vecuma ietekmi uz sulfātcelulozes atlējumu stiepes stiprību (skat. 3.8. att.), var novērot, ka visām koku sugām, palielinoties koka vecumam, papīrmasas stiepes stiprības indekss samazinās. Arī šī iemesla dēļ būtu ieteicams sulfātcelulozes iegūšanai izmantot jaunākus kokus vai to daļas (aplievas daļas, koku galotnes daļas vai arī sortimentus no audzes kopšanas cirsmām).

Tāpat 3.8. attēlā var rast apstiprinājumu faktam, ka lauksaimniecības zemēs augušās apses un apses hibrīdu papīrmasas uzrāda augstāku stiepes stiprības indeksu, salīdzinot ar meža zemēs augušajām priedēm. Tā ir atšķirīgo koku vecuma ietekme, jo, pieaugot koku vecumam 3 reizes,

papīrmasas stiepes indekss samazinās 2 – 2,5 reizes ($p < 0,05$). Jaunākiem kokiem papīrmasas šķiedras ir mehāniski stiprākas, un tāpēc no šķiedru stiprības viedokļa papīrmalku ir izdevīgāk iegūt no meža pirmējās retināšanas, vai arī ierīkot ātri augošas plantācijas. Tas zināmā mērā sasaucas ar skandināvu kolēģu „EuroFibre” pētījumu rezultātiem¹, kur viņi secināja, ka no koksnes apļievas daļas (jaunākā koksnes daļa) var iegūt mehāniski stiprākas šķiedras. Pēc pašreizējiem pētījumu rezultātiem redzams, ka koku vecums mazāk ietekmē bērza papīrmasas stiepes indeksu ($R^2 = 0,06$).



3.8.att. Koka vecuma un sulfātcelulozes stiepes pretesības indeksa korelācija.

Fig. 3.8. *Correlation between the tree age and Kraft pulp tensile strength index.*

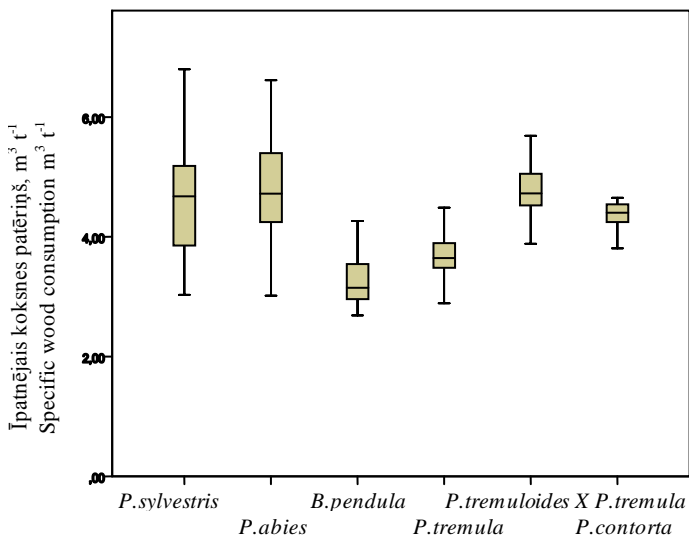
Apzīmējumi / Designations: 1 *P. sylvestris*, $R^2=0,282$; 2 *P. abies*, $R^2=0,458$; 3 *B. pendula*, $R^2=0,008$; 4 *P. tremula*, $R^2=0,339$, 5. *P. tremuloides* X *P. tremula*, $R^2=0,434$.

Tomēr jāņem vērā to, kāda papīra vai kartona produkcija tiek ražota un kāda ir izejmateriālu cena. Kā rāda tālāk aprakstītie pētījumi, jaunāku koku izmantošana sulfātcelulozes ražošanai ir saistīta ar lielāku koksnes patēriņu 1 t sulfātcelulozes ieguvei. Līdz ar to, svarīgi ir aprēķināt koksnes apjoma patēriņu, lai iegūtu 1 tonnu sulfātcelulozes (KP_1). Tas ietver gan sulfātcelulozes iznākumu, gan arī koksnes blīvumu, un ir proporcionāls vārkatla ražībai.

¹ Lundqvist S.O. (2003) The EuroFibre Project objectives, layout and general results: EuroFibre seminar, STFI, Sweden

Kā rāda iegūtie dati, koka suga būtiski ($p < 0,05$) ietekmē īpatnējo koksnes patēriņu sulfātcelulozes ieguves procesā (skat. 3.9. att.), un vismazākais tas ir bērziem ($3,3 \pm 0,4 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$).

Īpatnējais koksnes patēriņš ir lielāks jaunākiem paraugkokiem. Egles un Parastās priedes paraugkokiem novērojama vislielākā īpatnējā koksnes patēriņa izkliede $3,0 - 5,8 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$. Augsto īpatnējo koksnes patēriņa izkliedi daļēji var skaidrot ar meža augšanas apstākļu ietekmi (transformētās lauksaimniecības zemes, kā arī plantācijas, kas ierīkotas uz tāda paša tipa zemēm), jo minētajās meža zemēs augušie koki uzrāda lielāku pieaugumu, kas arī nozīmē plānāku sieniņu šķiedras, kas satur salīdzinoši vairāk lignīna¹.



3.9.att. Īpatnējais koksnes patēriņš dažādām koku sugām 1t sulfātcelulozes iegūšanai.

Fig. 3.9. Specific wood consumption for production of 1 t of pulp from different tree species.

Līdz ar to ātraudzīgiem (jaunākiem) kokiem delignifikācijas procesā novērojams palielināts īpatnējais koksnes patēriņš, salīdzinot ar vecākiem kokiem. Ražojot papīru, būtiski ir zināt gan šķiedru garumu, gan platumu,

¹ Oluwafemi O.A., Sotannde O.A. (2007) The Relationship Between Fibre Characteristics and Pulp-sheet Properties of *Leucaena leucocephala* (Lam.): Middle-East Journal of Scientific Research 2 (2): 63-68.

jo šie parametri būtiski ietekmē produkta kvalitāti. Sagrupējot delignificētas koksnes šķiedras pēc to garuma un platumā, veidojas piecas grupas:

1. Starp izpētīto Parasto un Klinškalnu priežu koksnes šķiedru dimensijām nav novērojamas statistiski būtiskas atšķirības. Tādēļ var teikt, ka no šķiedru morfoloģijas viedokļa tās ir līdzīgas izmēros un, salīdzinot ar citām pētījumā iekļautajām koku sugām, ir visplatākās $32,5 \pm 0,2 \mu\text{m}$, un to garums sasniedz $2,18 \pm 0,04 \text{ mm}$;

2. Egles sulfātcelulozes šķiedras ir visgarākās - $2,46 \pm 0,03 \text{ mm}$, bet ar mazāku platumu - $27,2 \pm 0,1 \mu\text{m}$;

3. Bērza šķiedru garums ir $1,00 \pm 0,03 \text{ mm}$, un to platumā ir $21,5 \pm 0,2 \mu\text{m}$;

4. Apses šķiedru garums ir $0,86 \pm 0,11 \text{ mm}$, bet platumā $21,9 \pm 0,6 \mu\text{m}$;

5. Apses hibrīdu šķiedras ($0,75 \pm 0,11 \text{ mm}$) statistiski būtiski ($p < 0,05$) īsākas par Parastās apses šķiedrām; savukārt, nepastāv būtiskas ($p > 0,05$) atšķirības starp minēto koku sugu sulfātcelulozes šķiedru platumiem ($21,4 \pm 0,6 \mu\text{m}$).

Līdz ar to, no šķiedru izmēru aspekta, tādās pašās grupās varētu iedalīt arī papīrmalku, to eksportējot un pārstrādājot. Ņemot vērā Klinškalnu priežu un apses hibrīdu pieauguma ātrumu, līdz ar to, arī iespējamo audzes īso rotācijas laiku, minētās koku sugas ir konkurētspējīgas ar dienviņu puslodē augošiem kokiem (eikaliptiem).

Jāpiezīmē, ka augsts koksnes blīvums zāģmateriālu ražotājiem nozīmē produktu ar augstu stiprību. Celulozes ražotājiem tas norāda, ka no viena un tā paša koksnes apjoma var iegūt lielāku produkta (celulozes) iznākumu, salīdzinot ar zema blīvuma koksni. Taču visam ir savas robežas, jo koksne ar pārāk augstu blīvumu ($> 600 \text{ kg m}^{-3}$), it īpaši lapu koku sugām, ir tikpat nevēlama kā zema blīvuma ($< 400 \text{ kg m}^{-3}$) skuju kokiem. Tā piemēram, ja koksne ir ar blīvumu lielāku par 600 kg m^{-3} , mēbeles un ēku konstrukcijas ir pārāk smagas, bieži arī pārmērīgi stipras, un savienojumu vietas var kļūt vaļīgas, ja koksne izzūst. Papīra ražotājiem raupjas šķiedras nozīmē arī pagarinātu šķiedru malšanas laiku, lai šķiedras fibrillētu un iegūtu blīvu papīru, kurā veidotos stipras starpšķiedru saites.

3.5. Tievkoksnes izmantošanas sulfātcelulozes ražošanai ekonomiskais novērtējums

Veikti aprēķini, lai novērtētu tievkoksnes izmantošanu sulfātcelulozes ražošanai arī ekonomiski. Kā alternatīva metode šķiedru iegūšanai tiek izskatīta ķīmiskā termomehāniskā masa (angl. *CTMP*, kas ir starptautiski pieņemts saīsinājums).

Koku audzēšanas ekonomiskā pamatojuma aprēķinā no meža īpašnieka viedokļa izmantoti taksācijas dati (krājas pieaugums gada laikā)

par krājas veidojošo valdošo sugu un pētījumā raksturoto attiecīgo koku sugu sulfātcelulozes iznākumi. Literatūrā ir atrodami dati par koksnes, kas paredzēta papīrmasas šķiedru, kā arī MDF, HDF un OSB plātņu iegūšanai, pieaugumu ātrumiem. Urugvajā¹ lapu koku pieaugums ir ap 40 m³ ha⁻¹; Dienvidsomijā – 5,4 m³ ha⁻¹ un Dienvidzvidrijā – 5,9 m³ ha⁻¹. Visvairāk koksnes no ha gada laikā Latvijā var iegūt no apses hibrīdu plantācijām, kam raksturīgs īss audzes rotācijas cikls 8 – 12 gadi, kur koksnes pieaugums ir 20 m³ ha⁻¹. Salīdzinot šos pašus datus skuju kokiem, to pieaugums¹ Urugvajās mežos ir ap 35 m³ ha⁻¹; Dienvidsomijā – 5,0 m³ ha⁻¹ un Dienvidzvidrijā – 5,9 m³ ha⁻¹. Iegūtie dati liecina, ka lauksaimniecības zemēs augušās egles un priedes uzrāda par 70 % augstāku pieaugumu, salīdzinot ar Skandināvijas skuju kokiem. Taču Latvijā meža zemēs augošie skuju koki uzrāda zemākus koksnes pieaugumus, pārrēķinot uz vienu hektāru meža zemes - 2 – 3 m³ ha⁻¹.

Lai aprēķinātu ieguvumu no meža platības, salīdzināšanai izmanto datus par to, cik daudz sulfātcelulozes potenciāli iegūtu no viena ha meža platības. Salīdzināšanai izmanto arī ķīmiskās termomehāniskās masas (CTMP) cenu 530 EUR t⁻¹ pie masas iznākuma 90 %. Pieņem, ka mizas tilpums kokiem ir 15 %, ko ņem vērā, koriģējot krājas apjomu, koksnī pārstrādājot ķīmiski (sulfātceluloze) vai ķīmiski-mehāniski (CTMP). Izmanto arī promocijas darbā iegūtos koksnes blīvumus attiecīgajos meža tipos.

Lai novērtētu ekonomisko potenciālu arī naudas izteiksmē, aprēķinos izmanto pētījuma veikšanas laikā aktuālo „EUWID pulp and paper” informatīvo biļetenu Nr.41, kur sniegta 2011. g. 3. ceturkšņa cenas². Šajā periodā skuju koksnes sulfātcelulozes cena ir 700 EUR t⁻¹, bet lapu koksnes – 575 EUR t⁻¹. Aprēķināts arī potenciālais ieguvums, ja koki tiek eksportēti kā papīrmalka, aprēķinos izmantojot „StoraEnso” papīrmalkas iepirkšanas punkta cenas Jaunmīlgrāvja krautuvē 01.11.2011³; skuju koksnes papīrmalkas cena 32 EUR m⁻³, lapu koksnes papīrmalkas – 25 EUR m⁻³.

Veikts vienkāršots aprēķins, ņemot vērā tikai to, ka sulfātcelulozes tiešajās izmaksās koksnes iegādes izmaksas sastāda ap 40 %, bet ķīmiski-

¹ Anasaharju A. (2007) Chalgnes for the pulp and paper industry in Finland, Paper, packaging & forest products, 8 November. [tiešsaite] [skatīts 10.11.2011.]. Pieejams: <http://www.metla.fi/tapahtumat/2007/barents/presentations/ansaharju.pdf>

² EUWID, (2011) EUWID Price Review Germany third quarter 2011, Pulp and paper, informatīvais biļetens, Text no.: 002 Issue PP41/2011 Publication date: 12.10.2011. [tiešsaite] [skatīts 10.11.2011.]. Pieejams: <http://www.euwid-paper.com>

³ Stora Enso [tiešsaite] [skatīts 30.10.2011.]. Pieejams: <http://www.storaenso.com/wood-forest/wood-supply-baltic/latvia-region/ms-prkam/Pages/stora-enso-mes-ieprk.aspx>

termomehāniskās papīrmasas *CTMP* ražotnē – ap 30 %. Šajos aprēķinos nav ņemtas vērā kapitāla izmaksas. Pieņemts, ka meža īpašniekam pieder koksnes pārstrādes rūpnīcas akcijas (Ziemeļvalstu meža īpašnieku kooperatīvu modelis).

Pārēķinot koksnes pieaugumu naudas izteiksmē, ir redzams, ka, pārstrādājot koksni termomehāniskajā masā (angl. *CTMP*), ir iespējams gūt lielākus finansiālus ienākumus, salīdzinot ar sulfātcelulozi. To nodrošina lielāks papīrmasas šķiedru iznākums un nelielās papīrmasu šķiedru cenu atšķirības. Te gan jāpiebilst, ka termomehāniskā masa ir nišas produkts ar ierobežotāku pielietojumu, salīdzinot ar sulfātcelulozi. Vismazāk līdzekļu, no meža īpašnieka viedokļa, var iegūt, koksni pārdodot kādā no kokostām kā papīrmalku eksportam. Taču visvairāk līdzekļu var iegūt, koksni pārstrādājot termomehāniskās masas šķiedrās. Tiesa, pozitīvi ir jāvērtē fakts, ka pielietojot sulfātcelulozes ražošanas tehnoloģijas, nepastāv koku sugu limitācija dotajai tehnoloģijai, kā tas ir *CTMP*.

Naudas izteiksmē meža īpašnieka potenciālais ieguvums samazinās, koksni pārdodot sekojošā virzienā: termomehāniskā masa (*CTMP*), sulfātceluloze, papīrmalkas eksports. Arī papīrmalkas eksports uz citu valsti, pāri Baltijas jūrai, rezultējas ar tās pārstrādi sulfātcelulozes vai termomehāniskās masas ražotnē, taču visi ienākumi tad nokļūst attiecīgo ražotnes īpašnieku rokās, kā arī attiecīgās valsts budžetā nodokļu veidā.

Vislielāko pienesumu koksnes pieauguma un finanšu ziņā var iegūt no lauksaimniecības zemē izveidotām plantāciju tipa mežaudzēm – tas var būt 343 EUR ha⁻¹, pārstrādājot koksni sulfātcelulozē, 415 EUR ha⁻¹, ja koksni pārstrādā termomehāniskajā masā.

Apses hibrīdu īsais audzes rotācijas cikls ir pamatots ne tikai ar iegūstamās sulfātcelulozes augstajiem mehāniskajiem rādītājiem, bet arī finansiāli – pie īsa audzes rotācijas cikla ir iespējams iegūt arī vislielākos ieguvumus naudas izteiksmē (pārstrādājot to sulfātcelulozē 957 EUR ha⁻¹ un *CTMP* šķiedrās – 1156 EUR ha⁻¹).

Ekonomiskie aprēķini par papīrmalkas izmantošanu plātņu ražošanā nav veikti sakarā ar attiecīgo datu trūkumu un tāpēc arī tas netika izvirzīts kā darba uzdevums šajā pētījumā.

SECINĀJUMI UN PRIEKŠLIKUMI

Analizējot Latvijā iegūstamās tievkoksnes sortimentus un iegūstot virkni mērījumu datu, var izdarīt vairākus secinājumus un sniegt priekšlikumus mežsaimniekiem un koksnes pārstrādātājiem.

Secinājumi

1. Latvijā iegūstamā tievkoksne ir piemērota sulfātcelulozes ražošanai ar labām mehāniskajām īpašībām un šķiedru ģeometriskajiem parametriem.

2. Veiktais pētījums ir viens no koksnes zinātnes soļiem mērķtiecīgas saiknes veidošanā starp koku augšanas apstākļiem un vēlamā produkta (mūsu gadījumā sulfātcelulozes un papīra) īpašībām. Nozīmīgākie faktori, kas ietekmē sulfātcelulozes un tās papīra atlējumu īpašības, ir koku augšanas apstākļi, koksnes blīvums, šķiedru garums, kā arī celulozes saturs koksnē un celulozes polimerizācijas pakāpe.

3. Lauksaimniecības zemēs augušo koku sulfātceluloze uzrāda būtiski lielāku papīra atlējumu mehānisko stiprību, salīdzinot ar meža zemēs augušajiem kokiem. Starpība var sasniegt pat 23%. Latgales reģiona Maltas mežniecības no lauksaimniecības zemes transformētajā sausieņa mežā augušām eglēm ir paaugstināts lignīna un pelnu saturs, salīdzinot ar tuvumā esošām sausieņa meža eglēm (attiecīgi 29,5% un 0,29% pret 28,3% un 0,23%).

4. Meža augšanas apstākļi ietekmē priedes, egles, bērza un apses koksnes blīvumu. Pētījuma robežās lielāks blīvums ir konstatēts priedēm, kas augušas sausieņu un slapjaiņu mežos (attiecīgi $615,9 \pm 8,3 \text{ kg m}^{-3}$ un $618,4 \pm 8,4 \text{ kg m}^{-3}$), kā arī bērziem sausieņu mežos ($677,0 \pm 8,4 \text{ kg m}^{-3}$). Eglēm lielākais koksnes blīvums ir novērojams slapjaiņu mežos ($545,6 \pm 8,4 \text{ kg m}^{-3}$), savukārt, apsei – āreņu mežos ($532,3 \pm 5,9 \text{ kg m}^{-3}$).

5. Apses hibrīdu nemaltas sulfātcelulozes atlējumu stiepes pretestības indekss ir robežās no 27,2 līdz 34,9 Nm g⁻¹ un caurspiešanas indekss ir robežās no 0,68 līdz 0,93 kPa m² g⁻¹, kas var konkurēt pat ar skuju koku celulozi.

6. Ir novērojama tendence, ka āreņa un sausieņa mežos var iegūt koksnes paraugus ar lielāku ķīmiski tīrās celulozes saturu koksnē, kas attiecīgi sasniedz $52,2 \pm 0,3 \%$ un $51,4 \pm 0,3 \%$, savukārt, mazāks celulozes saturs ir lauksaimniecības zemēs ierīkotajās mežaudzēs un plantācijās. Izvēlēto paraugkoku gadījumā meža augšanas apstākļi ir ietekmējuši ekstraktvielu saturu koksnē.

7. Plantācijās augušie jaunie apses hibrīdi (9 ± 2 gadi) uzrāda līdzīgu tīrās celulozes saturu koksnē ($52,2 \pm 0,4 \%$) kā sausieņos ilgāk (44 ± 18 gadi) augušās Parastās apses ($52,2 \pm 0,6 \%$). Apses hibrīdi ar lielo pieaugumu un augsto celulozes saturu ir perspektīvi koki, ko ir iespējams audzēt Latvijā, lai konkurētu ar dienvējos audzētajiem eikaliptiem.

8. Koksnes analīzes iekārta „SilviScan” ir efektīvs instruments tajos gadījumos, kad jānoskaidro koku augšanas „vēsture” un tiek veikta mērķtiecīga koku audzēšana noteiktām vajadzībām un izmantošanas

veidam, piemēram, attīstot hibrīdus (piemēram, plantāciju koku audzēšana rūpniecības vajadzībām).

9. Pelnu daudzums ir palielināts kokiem, kas auguši kādreizējās lauksaimniecībā izmantoto zenju platībās, līdz ar to varētu spriest, ka no zemes koki ir uzņēmuši vairāk minerāl- un mikroelementus.

Priekšlikumi

Augstākminētie secinājumi ļauj izvirzīt sekojošus priekšlikumus:

1. Koku sugu relatīvi īsās audzes rotācijas un sulfātcelulozes šķiedru un tās augsto mehānisko stiprību dēļ, rekomendēju apmežošanai izmantot LVMI „Silava” un AS „LVM” stādaudzētavās izveidoto apšu hibrīdu klonus un introducētas Klinškalnu priedes stādus.

2. Apses hibrīdu audzes rotācijas ciklu rekomendēju noteikt 8 – 10 gadu garu, jo šajā laikā ir izveidojušās mehāniski stipras koksnes šķiedras, kā arī ir iespējams iegūt vislielākos ieguvumus naudas izteiksmē. Jāatzīmē arī apstākļi, ka sēņu bojājumiem nenoturīgām koku sugām (kā tas ir raksturīgs apsēm un apses hibrīdiem) īsāks audzes rotācijas cikls, nozīmē arī potenciāli mazākus sēņu nodarītos kaitējumus (mazāks trapes sēņu ekspozīcijas laiks, lai koksnei nodarītu kaitējumu – kvalitātes zudumus).

3. Pētījumus nepieciešams turpināt, lai noskaidrotu mikro fibrillu leņķu izmaiņas ietekmi uz tievkoksnes kvalitāti. Nepieciešams arī noskaidrot, kā koku šķiedru ģeometrisko parametru (šķiedru sienīgas biezums, lumena laukums, to savstarpējā attiecība) izmaiņas ietekmē koksnes mehāniskās īpašības. Tādējādi būtu iespējams, izmantojot mērķtiecīgus mežsaimnieciskos pasākumus, iegūt koksni ar konkrētam produktam nepieciešamo kvalitāti.

1. GENERAL CHARACTERIZATION OF THE WORK

Topicality of the theme

The wood resources available in the forest represent one of the some types of resources on the globe, which have the ability to renew. According to the Forest statistics inventory data, in Latvia, forest lands occupy about 3.8 million ha, which makes up slightly more than 56.9 % from the state territory (Forest statistic inventory's cycle 1 (2004 – 2008)). Latvian stands are formed mainly by three tree species: pine, spruce and birch. Their stands together occupy 86 % from the whole forest area. The share of stands of aspen and other deciduous tree species in Latvia grows, because agricultural lands continue to grow up with deciduous trees, and a part of the land used in agriculture is systematically afforested. Besides, private forest clearings, where artificial forest renewal measures have not been carried out, are renewed with deciduous tree pioneer species. The growing popularity of aspen hybrids as a planting material should be also mentioned, because they achieve the cutting diameter faster and have a greater precocity than the „parents” – Common aspen (*P.tremula* L.) and American aspen (*Populus tremuloides* Michx.).

In Latvia' forests, about 30 % of the stored up round timber is formed by small diameter trees, although the properties of such trees (pulpwood) and their products in Latvia are scarcely investigated. To a known extent, this is explained by the fact that, for the most part, small diameter wood are exported as pulpwood, which is not processed in Latvia; therefore, this assortment group has not gained the sufficient attention of researchers and manufacturers. However, there is no justification to the fact that there is scarce knowledge on the high volume (more than 3 million m³ per year¹) export commodity. Besides, an increasingly greater part of pulpwood, especially conifers, is used in Latvia as small diameter sawlogs and as the raw material for the production of boards and other composite materials.

Undoubtedly, in principle, Latvian pulpwood are suitable for the production of Kraft pulp. In foreign pulp mills, especially those in Sweden, about 3 million m³ of the pulpwood of Latvian origin is processed to Kraft pulp and wood chips each year. In companies such as „M-real”, „Holmen”, „Domsjö” and others, from the pulpwood that are imported from Latvia and other Baltic states, thermomechanical, chemi-thermomechanical paper pulp and Kraft pulp are produced for chemical processing (for nitrocellulose and fibre production), although most of Kraft pulp is used for papermaking.. However, this practice does not testify much on the specific properties of Latvian pulpwood, important in the competition on the markets. It is because, firstly, the imported pulpwood in many Scandinavian mills is a relatively small (about 5 – 15 %) additive to the local raw material group;

secondly, the counterflow of information from the pulpwood consumers in Sweden and other countries is very scarce and incomplete. Similarly to how it is done in Sweden, also in Latvia, we have to elucidate ourselves the properties of our wood so that to use this knowledge both to supplement the theoretical luggage and also practically in timber market conditions.

Scientific novelty of the work

For the first time, the properties and chemical composition of the pulpwood obtained in Latvia is studied systematically and comprehensively.

For the first time, the properties of the aspen hybrid (*Populus tremuloides X Populus tremula*) wood selected in Latvia and its Kraft pulp are studied.

For the first time, the chemical composition of the Lodgepole pine (*P.contorta*) wood grown in Latvia and the properties of the Kraft pulp produced thereof are studied.

Correlations between the characteristics of forest pulpwood and the Kraft pulp produced thereof are determined.

For the first time, a sample of the birch wood grown in Latvia is analyzed on a „SilviScan 3” device, determining a whole range of wood parameters in separate annual rings.

A novel procedure of annual ring measurement is developed, which is applied in the research process at the LS Institute of Wood Chemistry.

An method for wood consumption calculations is developed for the comparison of wood processing technologies.

Practical significance of the work

New knowledge of the properties of Latvian forest pulpwood enhances the competitiveness of both the forest owners and processing companies, and sellers. At present, already many European pulp and paper mills, as well as some boards’ manufacturers follow the provenance of their raw material – wood, taking into account not only the legal side of the wood provenance, but also the forest type and the tree growth conditions. Hence, owing to the studies, recommendations are given to forest owners in respect to forest area renewal, evaluating the properties of the tree species and their differences.

Potentialities of the new, digitalized and automated research equipment („SilviScan 3” and Lorentzen & Wettre „FiberTester”) for elucidating the properties of Latvian wood are demonstrated.

The obtained data on Latvian forest pulpwood and the Kraft pulp produced from them are used in university textbooks. These data can be used also in the future, when the researchers and practitioners show an increased interest in the pulpwood and its use in biorefinery, pyrolysis, delignification and other processes.

Aim of the study

The aim of the study was to assess the suitability of the tree species grown in Latvia for Kraft pulp production.

Practical tasks of the work

- To elucidate the physical properties and the main chemical components' indicators of the forest small diameter trees (pulpwood) grown in different regions and forest growth types of Latvia.

- In laboratory conditions, to produce Kraft pulp and to elucidate its physical and chemical parameters.

- To elucidate the possible regularities between the wood and Kraft pulp parameters, and to assess the suitability of the pulpwood Latvia obtained for Kraft pulp production.

Structure and volume of the Doctoral thesis

The Doctoral thesis subordinates the tasks of the study and consists of the 6 chapters:

Chapter 1. Review of the literature on the chemical structure and composition of wood, as well on the factors that influence those changes. Also one of the research methods for the comprehensive studies of wood using a „SilviScan” device is considered.

Chapter 2. The materials and methods applied in the study are described.

Chapter 3. Results of the study on the effect of the physical properties and chemical composition of coniferous wood and the Kraft pulp produced thereof, the tree species and growth conditions on the properties of wood and paper pulp, are given.

Chapter 4. Results of the studies on the physical and chemical composition of deciduous wood and the Kraft pulp produced thereof, in which the effect of the tree species and growth conditions on the properties of wood and paper pulp is elucidated, are presented.

Chapter 5. The most important correlations between the properties of pulpwood and Kraft pulp are considered.

Chapter 6. Economic assessment of the use of pulpwood for the production of Kraft pulp, in which an economic evaluation of the processing of pulpwood is given, taking as a basis the rate of wood increment and the market price of the obtained product.

The Doctoral thesis consists of 125 pages, on which information is summarized in 66 figures and 32 tables. 174 literature references are used in the work.

2. MATERIALS AND METHODS OF THE STUDY

Coniferous and deciduous sample trees from 7 different Latvia's regions and 5 forest growth conditions were used to fulfil the tasks of the Doctoral thesis. In connection with the afforestation of agricultural lands, sample tree fields are established also in these lands. Sample trees of Scots pine (*P. sylvestris*), Norway spruce (*P.abies*), Silver birch (*B.pendula*), Common aspen (*P.tremula*), aspen hybrids (*P.tremuloides x P.tremula*) and Lodgepole pine (*P.contorta*) are included in the study. A total of 130 sample trees are analyzed.

The determination of the chemical and physical parameters of wood as well as the production of Kraft pulp and its characterization were carried out using the stem's part at the height from 0.0 to 1.3 m:

Unit I (0 – 0.5 m) was used for tree age determination and reserve;

Unit II (0.5 – 1.0 m) – for wood density determination;

Unit III (1.0 – 1.3 m) – for Kraft pulp production, for determining the chemical composition of wood, and annual rings' width and latewood determination.

2.1. Determining of the physical and chemical properties of wood

The physical and chemical composition of wood was determined according to the elaborated scheme (see Fig. 2.1.), formed based on the requirements of the TAPPI, DIN, EN standards, in the logical sequence of their realization.

Wood moisture was determined, drying the wood at a temperature of 103 ± 2 °C, according to the requirements of the TAPPI 258 om – 94 and DIN 52 183 standards.

Content of sapwood and heartwood

Pine wood was stained with a benzidine solution¹.

The spruce heartwood is distinguished from sapwood by applying a bromocresol green indicator².

Wood density ρ was determined according to the DIN 68 364 and TAPPI 258 om – 94 standards, conditioning the samples in a standardized climate (23 ± 1 °C and $\gamma\%$ 50 ± 2 %) in compliance with the DIN 50 014-20/65-1 standard.

¹ Jurchenko V.N. (1985) Osnovi nauchnih issledovani: St.Petersburg, LTA, 150 p. (in Russian)

² Sanderman W., Hausen B. (1967) Orientierende Versuche zur Differenzierung von Splint und Kern sowie zum Sichtbarmachen der ubergangzone von Fichte un anderen Nadelholzen. Das Papier 21, 349-354.

Wood extractives were determined according to the TAPPI 204om – 88 standard, and an alcohol-benzene mixture was used.

Cellulose content (according to the Kurschner - Hoffner method) was determined according to the requirements of the TAPPI 203cm – 99 standard, in 95 % ethyl alcohol (C₂H₅OH) and concentrated nitric acid (HNO₃) solution (4:1).

Ash content was determined gravimetrically according to the requirements of the TAPPI 211om – 93 standard, as a residue after the wood heating at the temperature of 575 ± 25 °C.

Lignin content was determined according to the requirements of the TAPPI 222om - 98 standard, Klason (insoluble in sulphuric acid) lignin determination.

Kraft pulp was produced by the single-stage Kraft delignification method. The delignification process parameters were as follows: the concentration of active alkali in the cooking liquor 57.4 g l⁻¹ (as Na₂O units), sulphidity 29.8 %, hydromodulus 4.5 : 1; maximum delignification temperature 165 °C, delignification time 75 min for deciduous trees and 85 min for conifers. Two-four repeated cookings were performed for one and the same sample, fibreized in a laboratory pulp disintegrator at a rate of 4000 min⁻¹, 25 s, casted in a Buchner funnel and dried at room temperature until a constant weight was reached.

2.2. Determining of the physical and chemical properties of Kraft pulp

The properties of Kraft pulp were determined according to the scheme illustrated in Fig. 2.2., which is formed based on the requirements of the TAPPI, DIN, EN standards, in the logical sequence of their realization. Kraft pulp strength was analyzed without its beating, so that the Kraft pulp fibre transformations in the beating process would not produce secondary effects.

The chemical composition of Kraft pulp was determined in the following way:

Lignin content – in the same way as for wood according to the TAPPI 222om - 98 standard, only taking a greater sample, namely, 0.32 – 0.33 g.

Degree of polymerization DP of cellulose was determined, measuring the cellulose – cadoxen solution viscosity at the temperature +20 °C in a water bath, in accordance with the procedure described in the GOST 25438 - 82 standard.

Specific wood consumption KP_i (m³ t⁻¹), so that to produce 1 t of Kraft pulp, was calculated from the relationship:

$$KP_i = \frac{1}{I_{pap} \times \rho} \times 10^5$$

where, ρ – wood density, kg m⁻³

I_{pap} – pulp yield, %

The dimensions and form of Kraft pulp fibres were determined using the automatic device Lorentzen&Wettre „FiberTester”.

Water retention value of fibres was determined according to the SCAN-C62:00 standard, in a centrifuge with $G = 3000 \pm 20 \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$ and centrifugation time 25 min.

Kraft pulp handsheets were made according to the ISO 5269-2 standard, using PTA Rapid-Kothen handsheet equipment. Handsheets were made in the grammage range $65 - 80 \text{ g m}^{-2}$.

Brightness degree was determined using a diffusion whiteness measuring device (with $d/0^0$ geometry) Elrepho, according to the ISO 2470 standard.

Tensile strength for paper pulp handsheets was determined according to the requirements of the DIN EN ISO 1924-1 standard. For paper pulp samples' comparison, tensile strength index TI (Nm g^{-1}), stretch at break I (%), breaking length BL (m), and tensile energy absorption and tensile energy absorption TEA (J m^{-2}) were used.

Burst strength index ($\text{kPa m}^2 \text{ g}^{-1}$) for paper pulp was determined according to the requirements of the ISO 2758 standard.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Properties of coniferous and deciduous trees and pulpwood

The lowest wood density was observed for the spruce trees ($398 \pm 10 \text{ kg m}^{-3}$) grown in the Malta forestry and the former agricultural lands, which is explained by the moderate age of the trees (25 ± 2 years) and the low percentage content of latewood (24 ± 5.0 %). Wood age positively correlates with wood density – Norway spruce – $R^2 = 0.519$; ($p < 0.05$) and Scots pine – $R^2 = 0.508$ ($p < 0.05$). For Lodgepole pine, these correlations are not close and considerable ($R^2 = 0.023$; $p = 1.000 > 0.05$), which is explained by the homogeneous wood age of 25 ± 2 years (see Fig. 3.1.) for the available Lodgepole pine tree samples. For the deciduous trees included into the study, the mentioned correlations are not close and significant.

Wood density for birch is determined to be in the range from 607 to 677 kg m^{-3} , and for aspen – in the range from 378 to 537 kg m^{-3} . Solving the two factor dispersion analysis, it is concluded that the forest growth conditions considerably ($p < 0.05$) influence wood density. The greatest wood density for birch is observed in the dry site forest growth conditions type ($677 \pm 8 \text{ kg m}^{-3}$), in its turn, for aspen - in drained mineral soil forest ($537 \pm 9 \text{ kg m}^{-3}$). The lowest wood density is for aspen wood, which grew in

a plantation type forest, in which wood with a great increment (broad annual rings) is formed. Using the correlation analysis, it has been found that the age of the felled sample trees positively correlates with wood density (for aspen $R^2 = 0.456$; for aspen hybrids $R^2 = 0.457$; $p < 0.05$). For birch, such a correlation is considerable ($p < 0.05$), but still very weak – $R^2 = 0.033$.

The annual ring width values of deciduous trees are in rather a great range: for birch – from 0.8 to 1.2 mm, for aspen wood – from 1.5 to 6.8 mm; in its turn, for aspen hybrids, annual ring width is determined to be in the range 2.6 – 5.9 mm. Also a high scatter of tree age was established, namely, 41 to 63 years for birch and 12 to 47 years for aspen. Also 12-year old aspen hybrids were included in the study, and 41 ± 3 -year old aspen hybrids – to the control. Annual ring width, on the average, is even 4 times greater for aspen hybrids and plantation-grown aspens, in comparison with the aspen grown on forest lands. This, in its turn, means a faster increment of the wood mass and diameter for these trees (see Fig 3.2.), as well as 3 – 4-fold shorter rotation time.

The different increment rate of tree growth determines also the different morphology of wood, namely, heartwood content, as well as fibre width, length, wall thickness. In the studies carried out in Estonia¹, a considerable effect of soil refinement on the heartwood volume has been found. The author writes that, in Scots pine, with increasing soil fertilization, the share of heartwood decreases. Our study cannot confirm the results of the studies, because a contrary tendency is characterized for the pines included in our studies – the pines grown in dry site have a greater content of heartwood in comparison with the pines grown on soils rich in organic substances (drained mineral soils or drained peaty soils). It has been observed in the study that there is a positive, close and significant correlation ($R^2 = 0.711$; $p < 0.05$) between the wood age and the heartwood content therein.

For younger trees, also a lesser amount of heartwood ($22.5 \pm 5.3\%$) is characterized, compared with the case of older trees ($52.7 \pm 3.4\%$ and $47.8 \pm 5.0\%$, respectively). This agrees with the data available in the

¹ Pikk J., Kask R., Peterson P. (2006); The wood quality of fertilized Scots pine (*P. sylvestris* L.) stands on *Vaccinium vitis-idaea* and *Cladonia* site type. *Metsanduslikud Uurimused* 44, 9–19. ISSN 1406-9954., [website] [viewed 10.11.2011.]. available
http://mivana.emu.ee/orb.aw/class=file/action=preview/id=270405/mets_44-1.pdf

literature, that the content of heartwood correlates positively with the cambial age of wood ¹.

3.2. Chemical composition of coniferous and deciduous wood

An assessment of the effect of the forest growth conditions on the content of the wood component – lignin shows that it is considerably ($p < 0.05$) lower for the conifers grown on forest lands than that grown in the transformed agricultural land. Lignin content for spruce pulpwood samples ranges from 26.3 to 29.5 %, and for Norway pine trees from 26.3 to 34.2 %. Lignin content for the wood of Lodgepole pine grown on agricultural soils is 26.4 ± 0.7 %. The highest content of lignin (29.5 ± 1.1 %) is observed for the spruce grown in the forest transformed from agricultural lands; in this case, the lowest content of cellulose (51.0 ± 1.4 %) was found. However, no considerable distinctions ($p < 0.05$) in the lignin content for spruce wood were observed for the stands where no agricultural operations had been carried out before. Hence, it is assumed that the distinctions in the content of lignin and mineral substances is influenced by the agricultural fertilizer. This agrees also with the literature data on the effect of a mineral fertilizer on lignified plants: cellulose content slightly decreases, and lignin content grows. There is the same tendency also for pines, namely, lignin content for the pines grown on the forest lands transformed from agricultural lands is the highest, namely, 34.6 ± 1.2 %, compared with that for the pines grown in forest land stands, namely, (26.5 ± 1.3 %), and this distinction is also statistically significant ($p < 0.05$).

In its turn, the assessment of the effect of forest growth conditions on the content of lignin and cellulose in wood for deciduous trees wood shows no considerable distinction. However, according to the obtained data, the type of the forest growth conditions and the wood species influence the content of extractives and ash in wood as well as the Kraft pulp yield. Ash content for the deciduous trees grown on the former agricultural lands is considerably increased ($p < 0.05$), which could be explained by the increased content of mineral substances in the soil remaining after agricultural operations. This could adversely effect the bleaching of the Kraft pulp obtained from this wood, applying the bleaching technologies in which hydrogen peroxide is used as a bleaching agent.

Cellulose content in Scots pine wood is determined to range from 48.2 to 54.0 %; in this case, the considerably lower (by 3.6 %) content of cellulose in wood is shown by the pine grown on the former agricultural

¹ Climent J. et al. (2002), Relationship between heartwood radius and early radial growth, tree age, and climate in *Pinus canariensis*, *Can. J. For. Res.* 32(1): p.p. 103–111.

lands. For Norway spruce, the cellulose content in wood varies from 47.6 to 53.9. The highest cellulose content ($53.9 \pm 0.6\%$) is for the spruce grown in the drained peaty soil forest type.

The spruce grown in the wet mineral soil and drained peaty soil forests demonstrates a higher ($53.9 \pm 0.6\%$) content of cellulose in wood than pine ($50.7 \pm 0.6\%$). The pines grown in the dry site forest show a considerably ($p < 0.05$) higher content of cellulose in wood ($54.0 \pm 1.5\%$), compared with those grown on wet mineral soils and drained peaty soils ($51.3 \pm 0.6\%$ and $50.1 \pm 0.9\%$, respectively). This means that it can be planned to obtain a potentially higher yield of cellulose from the pines grown in dry site forests, which are the most suitable growing conditions for pine from the forest owners' viewpoint¹ and which is regulated by the regulations No. 1453 „Regulations for forest regeneration” of the Cabinet of Ministers. Lower ash content is observed for the spruce grown in the Malta dry site forest type, compared with that for the spruce grown in the Ieriķi dry site forest ($0.23 \pm 0.01\%$ and $0.29 \pm 0.02\%$, respectively). The opposite tendency is observed in the extractives' content, namely, for Malta dry site trees, it is almost by 60% higher than that in the corresponding Ieriķi forest type ($2.2 \pm 0.4\%$ and $1.3 \pm 0.1\%$), which suggests that the content of mineral substances in wood is influenced not only by the forest type but also other factors (for example, the geographical region in which the tree is grown or tree genetics). In its turn, the highest ash content in wood is observed for the spruce grown in the Ieriķi drained mineral soil forest type and the spruce grown in the Madona dry site grown spruce, i.e. $0.32 \pm 0.05\%$ and $0.33 \pm 0.06\%$, respectively.

Comparing our data obtained at the Cellulose Laboratory of the LS Institute of Wood Chemistry with the data available in the literature, known distinctions were observed: the aspen wood samples used in our study are characterized by a higher cellulose content and a lower lignin content as found by Mackes and Lynch. It should be mentioned that, in Latvia in general, the chemical composition of aspen and birch pulpwood is scantily known; hence, the local earlier obtained data, with which the data of our study could be compared, are lacking. Dry site and drained peaty soil birches have a somewhat higher content of Kuerschner cellulose ($48.5 \pm 2.3\%$ and $48.7 \pm 0.7\%$, respectively), which, after Kraft pulping, is positively reflected also in the values of the yield of Kraft pulp from pulpwood ($47.4 \pm 1.3\%$ and $47.1 \pm 0.5\%$, calculated from the residue without lignin). A considerably higher content of cellulose in wood ($p < 0.05$) is shown by the birches grown on the lands used in agriculture, namely, $49.3 \pm 0.9\%$, compared with the birches grown on forest lands,

¹ Mangalis I. (2004), *Meža atjaunošana un ieaudzēšana*; Rīga, izdevniecība Et Cetera 453 lpp. (in Latvian).

namely, $48.7 \pm 0.6 \%$; however, it should be mentioned that this distinction is minor, namely, $\sim 0.6 \%$. The birches grown on agricultural lands shows a considerably higher content of extractives in wood ($3.1 \pm 0.4 \%$), compared with the birches grown in forest lands, between which, in its turn, there is no considerable distinctions in the extractives' content ($p > 0.05$).

The content of aspen and aspen hybrids cellulose is higher than that in birch wood; in this case, this distinction is statistically significant ($p < 0.05$). In practice, the high quality of the aspen wood thermomechanical pulp is of great importance, and aspen is one of the most used wood species in this field. As an example, „Estonian Cell” can be mentioned, in which only aspen wood is used for paper pulp production¹.

3.3. Properties and chemical composition of coniferous and deciduous wood Kraft pulp

The total yield (with lignin) of the obtained Kraft pulp from the lignin residue is demonstrated in Table 3.1.

The range of the Kraft pulp yield is relatively broad, namely, from 43.3 to 54.5 % in terms of the oven dry wood. For spruce, the forest growth conditions have no marked effect on the Kraft pulp yields ($p < 0.05$). The yields of aspen wood Kraft pulp are greater ($p < 0.05$) than those for birch wood. The Kraft pulp yield from aspen wood is in the range from 50.3 % to even 58.7 % at the residual lignin content 0.8 – 1.4 %, but that from birch wood is between 47.6 % and 48.2 %, and the lignin content is about 2 %.

For the aspen grown on drained mineral soils, the Kraft pulp yield is substantially ($p < 0.05$) higher, namely, $54.5 \pm 0.8 \%$, but it is the lowest for the aspen grown in the land transformed from agricultural land, namely, $51.6 \pm 1.8 \%$. The same tendency is typical also for birch – the Kraft pulp yield for the birch grown on the agricultural land is somewhat lower ($47.1 \pm 1.5 \%$) compared with the birch grown in the wet mineral soil forest type of the forest land, namely, $47.6 \pm 0.6 \%$, which is a considerably lower index as compared with that for the birch grown on dry site and drained mineral soils, namely, $48.1 \pm 0.8 \%$ and $49.0 \pm 1.6 \%$.

The use of the new research equipment, in this case, the digital fibre dimension measuring device „FiberTester”, ensures the fast and high-quality determination of the fibre parameters (length, width, form, coarseness) (see Table 3.2.). It is found that the weighed average length of Scots pine sample trees' Kraft pulp fibres is 2.53 ± 0.04 mm, but for spruce 2.41 ± 0.03 mm, and these distinctions are considerable ($p < 0.05$). Weighed average lengths of birch Kraft pulp fibres for all samples are in the range

¹ Toland J. (2007) The Pride of Estonia: PPI, Jun 2007. [website] [10.11.2011.]. Available: http://findarticles.com/p/articles/mi_qa5371/is_200706/ai_n21290310#

from 0.98 to 1.06 mm, but those for the aspens grown in the forest are from 0.80 to 0.94 mm. The aspens grown on the former agricultural lands show a considerably ($p < 0.05$) lower fibre length; in its turn, the fibre width does not markedly ($p > 0.05$) differ from the fibre width of the aspens grown on the forest land, which would be explained by the tree age differences.

It should be also mentioned that the fibre lengths of both birch and aspen Kraft pulps are greater than those for eucalyptus Kraft pulp (0.80 ± 0.01 mm). It means that the quality and competitiveness of the Kraft pulp from the deciduous trees grown in Latvia is potentially higher. Certainly, the quality – price relationship should be also taken into account, which, on the whole, is favourable for manufacturers in the South, because eucalyptus is fast-growing, and the trees in the Northern hemisphere do not manage to compete. Probably, in the future, the aspen hybrids grown in Latvia, which demonstrate good growth rates, will be able to compete well with eucalyptus wood already in very well prepared soils^{1,2}, and, with the development of selection activities, in the future, it will be possible to develop (obtain) such aspen hybrids, which would be of equal growth rate value with eucalyptus.

Because Kraft pulping does not markedly influence the fibre length, then analyzing their differences, it is possible to judge the effect of forest growth conditions. The Scots pine fibre length in the Ieriķi dry site and wet mineral soil forest types does not essentially ($p > 0.05$) differ (2.62 ± 0.07 mm and 2.67 ± 0.07 mm, respectively). In its turn, considerably lower ($p < 0.05$) are the lengths and widths (2.29 ± 0.07 mm and 30.8 ± 0.3 μ m, respectively), of the Scots pine grown in drained peaty soils. For the spruce grown in the dry site forest type, the shortest (2.33 ± 0.27 mm) fibres are for the trees grown on the agricultural soils transformed in the 1979s. This is assumed to be due to the moderate age of the trees and therefore there is a proportionally great share of juvenile wood in the wood. As shown in the literature³, it is exactly juvenile wood that is characterized by shorter wood fibres as compared with mature wood. A comparison of the data with those available in the literature explains why the physical indices of the fibres are so low – this is due to the small age of the trees (10 years), during which juvenile wood with low fibre dimension indices is formed. The author of the Doctoral thesis believes that the

¹ Gailis A. (2005) Apses selekcijas pētījumi kvalitatīvas koksnes izaudzēšanai: Silava, Latvija. [website] [10.11.2011.]. Available: http://www.lvm.lv/files/text/apses_selekcija.pdf (in Latvian).

² Daugaviete M. (2004) Koku sugu un augsnes sagatavošanas veida izvēle dažādu lauksaimniecības augšņu apmežošanai, Faktu lapa LVMI “Silava” (in Latvian).

³ Lundqvist S.O. (2003) The EuroFiber Project objectives, layout and general results: EuroFiber seminar, STFI, Sweden.

physical indices of the fibres are closely connected with the cambium lignification processes and wood age, namely, the fibre length grows dramatically but not linearly in the tree juvenile part growth period and grows most dramatically with wood ripeness. In our study, in which different tree species with different ages are included, it is possible to carry out the analysis of the correlation between the tree age and the fibre length of delignified wood. This indicates that there is an average close relationship between these indices for different tree species, namely, for Norway spruce ($R^2 = 0.596$; $p < 0.05$), for Common aspen ($R^2 = 0.651$; $p < 0.05$), and for aspen hybrid ($R^2 = 0.773$; $p < 0.05$), respectively, while relatively longer fibres are formed for older trees. In its turn, for the rest of the tree species included in the study, these correlations are not significant, and also are not close ($R^2 = 0.01$; $p > 0.05$), see Fig. 3.3.

A study of the effect of latewood on the tensile strength of Kraft pulp handsheets demonstrates (see Fig. 3.4.) that, with increasing amount of latewood fibres in wood, hence, also in the Kraft pulp obtained from it, the tensile strength of Kraft pulp decreases ($R^2 = 0.30$, $p > 0.05$), obviously, owing to latewood fibres' thick walls (fibres' interface area, Fig. 3.5.).

Establishing the changes in the specific content of latewood, with increasing tree age, and the adverse effect of latewood on the tensile strength of the ready product – paper, it can be concluded that strong paper pulp can be produced from younger trees, which are also faster growing, with a low content of latewood.

This can be very well seen in an electron scanning microscope, which shows that the earlywood fibres after delignification close up (get compressed), losing the initial form, and bond well with each other; in contrast, the latewood fibres change their form little and bond poorly with the fibres present in the paper pulp (Fig. 3.6.).

It should be mentioned that the tree species, growth conditions and fibres' characterization are crucial in pulp production. For example, the fibres with thicker walls are more susceptible to mechanical damages than the fibres with thinner walls, which are more elastic¹. Similarly, it may be affirmed that, with increasing share of latewood in the Kraft pulp fibre mass, the energy consumption when beating the fibres also grows so that they would become more elastic (compressed fibre' lumens) in the beating process. From the viewpoint of high-quality writing-paper, the high content of latewood fibres there is not desirable. Similarly, it is important to prevent latewood fibres from getting into the upper layers of paper, because thereby the coarseness of the paper surface is enhanced and the absorbability of the

¹ Nyholm K., Ander P., Bardage S., Daniel G. (2001) Dislocation in pulp fibres – their origin, characteristics and importance – a review: Nordic Pulp and Celer Research Journal, 16 (2001) 4, pp. 376- 384.

ink or dye is decreased (flows can be produced as a result of paper printing – the dye or ink fails to be applied with the same intensity). This is achieved by multilayer paper production and paper coating technologies. Therefore, it would be also more economically attractive to produce pulp and paper for the wood with a lower content of latewood.

The measurements of mechanical strength and brightness for all the tree species included in the study are shown in Table 3.3., which shows that the unbleached conifer Kraft pulp is characterized by higher tensile and burst strength, but also by a considerably lower brightness.

The Kraft pulps from the aspens and aspen hybrids grown in dry site and former agriculture lands demonstrate higher ($p = 0.001$) mechanical strength indices than the sample trees grown in the drained mineral soils. Kraft pulp from the aspen trees grown in drained mineral soils demonstrates not only low mechanical indices, but also the lowest degree of brightness ($44.6 \pm 0.7 \%$). In its turn, the Kraft pulp obtained from the aspens grown in agricultural lands demonstrates a rather high degree of brightness ($53.4 \pm 0.8 \%$), and also very good tensile strength ($30.0 \pm 6.9 \text{ Nm g}^{-1}$) and burst strength ($0.88 \pm 0.25 \text{ kPa m}^2 \text{ g}^{-1}$) indices, which are even higher than the mechanical indices of Kraft pulp, produced from the pines grown in the dry site, wet mineral soils and drained peaty soils. The Kraft pulps produced from the plantation grown birches demonstrate considerably higher ($p < 0.05$) mechanical strength indices (tensile index $23.7 \pm 3.4 \text{ Nm g}^{-1}$ and burst index – $0.72 \pm 0.13 \text{ kPa m}^2 \text{ g}^{-1}$), compared with the mechanical strength indices of the paper pulp from the birches grown in the forest lands. In this case, it should be mentioned that the growth in mechanical strength is by 12 and 26 %, respectively, which is a very notable difference in the papermaking industry. The Kraft pulp from the birches grown in drained mineral soils demonstrates the lowest strength indices (tensile index $13.6 \pm 2.3 \text{ Nm g}^{-1}$ and burst index – $0.52 \pm 0.02 \text{ kPa m}^2 \text{ g}^{-1}$). It should be mentioned that the Kraft pulps from the birch trees grown in drained mineral soils and drained peaty soils demonstrate the substantially ($p = 0.003$) lowest Kraft pulp tensile indices at the same burst index results. This is assumed to be due to the fibre slenderness, because the birches grown in the drained peaty soil forest type demonstrate the highest fibre slenderness ($49 \pm 4 \text{ mm mm}^{-1}$) and fibre coarseness ($79.6 \pm 8.0 \text{ mg m}^{-1}$). This agrees to a known extent with the studies performed by Horn¹, in which, applying the multiple regression analysis, the regression equation of

¹ Horn A.R.(1978) Morphology of pulp fiber from hardwoods and influence on celer strength: Forest products laboratory, forest service, U.S. department of agriculture, Madison. [website] [10.11.2011.]. Available: www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrp/fplrp312.pdf

the fibre length L and the burst strength X of the casted handsheet was obtained:

$$X = -18.94 + 37.50 * L \quad (R^2 = 0.694).$$

Studying birch, aspen and aspen hybrid fibre length and handsheets burst strength, the following regression equations were obtained:

$$X_B = -0.167 + 0.735 L \quad (R^2 = 0.204, p = 0.002);$$

$$X_A = 1.705 - 1.132 L \quad (R^2 = 0.176, p = 0.001);$$

$$X_{HA} = 1.223 - 0.518 L \quad (R^2 = 0.008, p = 0.000).$$

Comparing the obtained relationships with those obtained by Horn, it may be concluded that the effect of the fibre length on burst strength for different tree species is different. With increasing fibre length, the birch paper pulp burst strength grows; in its turn, burst strength for aspen and aspen hybrids' paper pulp decreases. It can be concluded from the obtained results that the relationships obtained in our study are essential, although their correlation is not so close as the equation obtained by Horn. This is assumed to be due to the large number of sample trees included (total 130 sample trees) in our study, as Horn has investigated several tree species in his studies, although with a lesser number of repetitions.

3.4. Correlations between the properties of pulpwood and the Kraft pulp obtained thereof

With increasing lignin content in wood, the cellulose content in wood decreases, wherewith the yield of Kraft pulp, appropriately obtained in the Kraft pulping process, also decreases. The yield of Kraft pulp is lower than the analytically determined content of Kuerschner cellulose owing to its partial destruction in the delignification process, and the cellulose destruction for all the species included in the study occurs similarly (2 – 4 %), which is reflected in Fig. 3.7.

The study of the effect of the tree age on the Kraft pulp handsheets strength (see Fig. 3.8.) demonstrates that, for all tree species, with increasing tree age, the tensile strength index of paper pulp decreases. Also for that reason it would be advisable to use younger trees or their parts (sapwood parts, tree top parts or also assortments from the stand management cuttings).

Similarly, Fig. 3.8. may testify that the paper pulp produced from the aspens and aspen hybrids grown on agricultural lands demonstrates a higher tensile strength index compared with the case of the pines grown on forest lands. Such is the effect of the age of different trees, because, with a 3-fold increase of the tree age, the tensile strength index of the paper pulp decreases 2 – 2.5 times ($p = 0.000$). The paper pulp fibres are mechanically stronger for young trees, which testifies that it is more profitable to produce paper pulp (from the fibre viewpoint) from the first thinning of the forest, or

also arranging fast-growing plantations. This agrees to a certain extent with the results gained by Scandinavian colleagues in „EuroFibre” studies¹, after which they concluded that mechanically stronger fibres can be produced from the sapwood part (the youngest part of the wood – outer side of stem).

However, it should be taken into account, what kind of paper or cardboard products are produced and what is the raw material’s price. The studies described below show that the use of younger trees for Kraft pulp production is connected with a greater consumption of wood for producing 1 t of Kraft pulp. Hence, it is important to calculate the wood volume consumption so that to produce 1 t of Kraft pulp (KP_i). This embraces both Kraft pulp yield and wood density, and is proportional to the digester’s productivity.

The obtained data show that the tree species considerably ($p < 0.05$) influence the specific wood consumption in the Kraft pulp production process (see Fig. 3.9.), and it is the lowest for birch ($3.3 \pm 0.4 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$).

Specific wood consumption is the highest for the young sample trees. The highest scatter of specific wood consumption of $3.0 - 5.8 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ is observed for spruce and pine sample trees. The high scatter of the wood consumption can be partially explained by the effect of the forest growth conditions (transformed agricultural lands as well as the plantations arranged on the lands of the same type), because the trees grown on the mentioned forest soils show a higher increment that also means thinner wall of fibres, which contain relatively more lignin². Hence, the fast-growing (young) trees are characterized in delignification by an increased specific wood consumption as compared with older trees.

Classifying the delignified wood fibres in terms of their length and width, it can be seen that five groups are formed:

1. There are no statistically significant differences between the Scots and Lodgepole pine wood. Therefore, it could be said that, from the fibre morphology viewpoint, it is uniform and is characterized by a greater width of $32.5 \pm 0.2 \text{ }\mu\text{m}$, and its length reaches $2.18 \pm 0.04 \text{ mm}$.

2. Spruce Kraft pulp fibres are the longest, namely, $2.46 \pm 0.03 \text{ mm}$, but with the smallest width of $27.2 \pm 0.1 \text{ }\mu\text{m}$.

3. Birch fibre length is $1.00 \pm 0.03 \text{ mm}$, and width is $21.5 \pm 0.2 \text{ }\mu\text{m}$.

4. Aspen fibre length is $0.86 \pm 0.11 \text{ mm}$, but width is $21.9 \pm 0.6 \text{ }\mu\text{m}$.

5. The aspen hybrid fibres ($0.75 \pm 0.11 \text{ mm}$) are statistically significantly ($p < 0.05$) shorter than aspen fibres; in its turn, there are no

¹ Lundqvist S.O. (2003) The EuroFiber Project objectives, layout and general results: EuroFiber seminar, STFI, Sweden.

² Oluwafemi O.A., Sotande O.A. (2007) The Relationship Between Fibre Characteristics and Pulp-sheet Properties of *Leucaena leucocephala* (Lam.): Middle-East Journal of Scientific Research 2 (2): 63-68.

significant ($p > 0.05$) differences between the Kraft pulp fibre widths ($21.4 \pm 0.6 \mu\text{m}$) for the mentioned tree species.

At the same time, from the fibre size aspect, also pulpwood could be separated into the same groups, exporting it and especially processing it. Taking into account the Lodgepole pine and aspen hybrids' increment rate, hence, also the possible short rotation time of the stand, the mentioned tree species are, to a certain extent, competitive with the trees (eucalyptus) growing in the Southern hemisphere.

It should be mentioned that the high density for timber producers means a high strength product. For pulp producers, this indicates that one and the same volume of wood can give a higher yield of the product (pulp), in comparison with the low density wood. However, all has its limits, since the wood with a too high density ($> 600 \text{ kg m}^{-3}$), especially deciduous wood species, is as much undesirable as the low density ($< 400 \text{ kg m}^{-3}$) coniferous wood. Thus, for example, if the wood has a density of more than 600 kg m^{-3} , the furniture and building structures are too heavy, often also too hard, and the joining sites can become loose if the wood dries up. For paper manufacturers, coarse fibres mean also the extended fibre beating time to fibrillate the fibres and the obtained dense paper in which strong interfibrillar bonds are formed¹.

3.5. Economic assessment of utilizing small diameter trees for Kraft pulp production

Calculations were performed to assess the utilization of pulpwood for Kraft pulp production also from the economic viewpoint. As an alternative method for fibre production, chemical thermomechanical pulp (*CTMP*-internationally accepted abbreviation), is considered.

In the calculation of the economic substantiation of tree growing from the forest owner's viewpoint, taxation data (stock increment within a year) on the predominant species forming the stock and the yields of the Kraft pulp of the corresponding tree species are used. In the literature, data are available on the increment rates of wood, which is designed for producing paper pulp fibres as well as MDF, HDF and OSB boards. The increment² of Uruguay deciduous wood is about $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; in the Southern Finland – $5.4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ and in Southern Sweden – $5.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. In Latvia, most wood from 1 ha within a year can be produced from aspen hybrid plantations,

¹ Chauhan S. et. al (2010) Wood quality: in context: Primary wood processing (editor: Walker J.C.F.), Springer. Netherland. 596.

² Anasaharju A. (2007) Challenges for the pulp and paper industry in Finland, Paper, packaging & forest products, 8 November. [website] [10.11.2011.]. Available: <http://www.metla.fi/tapahtumat/2007/barents/presentations/anasaharju.pdf>

which are characterized by a short stand rotation cycle of 8 – 12 years, where the wood increment is $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Comparing these data for conifers, its increment² in Uruguay forests is about $35 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$; in the Southern Finland – $5.0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ and in Southern Sweden – $5.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. The obtained data testify that the spruce and pine trees grown in agricultural lands show by 70 % higher increment as compared with the Scandinavian conifers. However, conifers growing in Latvian forest lands show lower increments of wood, re-calculating to a hectare of the forest land, namely, $2 - 3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

To calculate the gain from the forest area, for comparison purposes, data are used on the amount of the potentially produced Kraft pulp from one ha of the forest area. For comparison purposes, also the price of *CTMP* 530 EUR t^{-1} at the pulp yield 90 % is used. Bark volume for trees is accepted to be 15 %¹, which is taken into account, correcting the stack volume when wood is processed by chemical (Kraft pulp) or chemical-mechanical (*CTMP*) treatment. The wood densities in the corresponding forest types, obtained in the Doctoral thesis, are also used.

To assess the economic potential also in terms of money, the newsletter No. 41 „EUWID pulp and paper”, which was valid during the study, was used, in which prices in the 3rd quarter of 2011² are offered. In this period, the price for coniferous wood Kraft pulp is 700 EUR t^{-1} , but for deciduous wood one – 575 EUR t^{-1} . Also the potential benefit is calculated, if the trees are exported as pulpwood, using in the calculations the „StoraEnso” pulpwood purchase spot prices of 01.11.2011.³ in the Jaunmīlgrāvis depository: 32 EUR m^3 for coniferous pulpwood and 25 EUR m^3 for deciduous pulpwood.

A simplified calculation is made, taking into account only the fact that the wood acquisition expenses in the Kraft pulp direct expenses are about 40 % of total production costs, but those in chemi-thermomechanical pulp (*CTMP*) production are about 30 %. Capital costs are not taken into account in these calculations. It is assumed that the forest owner holds shares of the wood processing plant (a model of Nordic forest owners' cooperatives).

Re-calculating the wood increment in terms of money, it can be seen that, processing wood in chemi-thermomechanical pulp (*CTMP*), it is possible to gain greater financial incomes as compared with the case of Kraft pulp. This is ensured by a greater paper pulp fibre yield and the

¹ Vaņins S., (1950) Koksnes zinātne: Rīga, Latvijas Valsts Izdevniecība, 470 lpp. (in Latvian).

² EUWID, (2011) EUWID Price Review Germany third quarter 2011, Pulp and paper, informatīvais biļetens, Text no.: 002 Issue PP41/2011 Publication date: 12.10.2011. [website] [10.11.2011.]. Available: <http://www.euwid-paper.com>

³ Stora Enso [website] [30.10.2011.]. Available: <http://www.storaenso.com/wood-forest/wood-supply-baltic/latvia-region/ms-prkam/Pages/stora-enso-mes-ieprk.aspx>

moderate differences in the paper pulp price. It should be noted here that the thermomechanical pulp is a niche product with a limited application, in comparison with Kraft pulp. Least funds, from the forest owner's viewpoint, can be gained, selling wood to a timber port as pulpwood for export. However, more funds can be gained by processing wood into Kraft or thermomechanical pulp fibres. Indeed, the fact should be taken into account that, using Kraft pulp production technologies, there is no tree species limitation for the given technology, as it is in the case of *CTMP*.

In terms of money, the forest owner's potential benefit decreases if wood is sold in the following sequence: chemithermomechanical pulp (*CTMP*), Kraft pulp, pulpwood export. Also the export of pulpwood to another country through the Baltic sea results in its processing in a Kraft pulp or thermomechanical pulp production, although all incomes then get in the hands of the corresponding production's owner as well as in the form of the corresponding state budget taxes.

The greatest contribution in terms of the wood increment and funds can be obtained from the plantation type stands arranged in the agricultural land – this can be 343 EUR ha⁻¹, processing wood into Kraft pulp, and 415 EUR ha⁻¹, if the wood is processed into thermomechanical pulp.

The shortest rotation cycle of aspen hybrids is grounded not only by the high mechanical indices of the produced Kraft pulp, but also financially – at a short rotation cycle, it is possible to gain also the highest benefit in terms of money (processing it into Kraft pulp - 957 EUR ha⁻¹ and to *CTMP* fibres – 1156 EUR ha⁻¹).

Economic calculations on the pulpwood utilization in board production were not performed owing to the lack of the corresponding data, and this was not the task of the Doctoral thesis.

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Analyzing the assortments of the small diameter trees available in Latvia and obtaining a whole range of measurements' data, several conclusions and recommendations for forest owners and wood processing companies can be made.

Conclusions

1. The pulpwood produced in Latvia is suitable for Kraft pulp production, which is characterized by good strength properties and fibres' geometrical parameters.
2. The study performed is one of the steps of wood science to purposely form a link between the trees' growth conditions and the

properties of the desired product (in our case, Kraft pulp and paper). The most significant factors that influence the properties of Kraft pulp and its handsheets are trees' growth conditions, wood density, as well as the cellulose content in wood.

3. The Kraft pulp from the trees grown on the former agricultural lands shows considerably higher mechanical strength of the handsheets, compared with the case of the trees grown on forest lands. The difference can reach even 23%. The spruce trees grown in Malta forestries of the Latgale region in the dry site forest transformed from agricultural lands are characterized by higher lignin and ash contents, compared with the neighbouring dry site forest spruce trees (29.5 % and 0.29 % against 28.3 % and 0.23 %, respectively).

4. The forest growth conditions influence the density of pine, spruce, birch and aspen wood. In the framework of the studies, the highest density is found for the pine trees, grown in the dry site and wet mineral soil forests ($615.9 \pm 8.3 \text{ kg m}^{-3}$ and $618.4 \pm 8.4 \text{ kg m}^{-3}$, respectively), as well as for birch trees in dry site forests ($677.0 \pm 8.4 \text{ kg m}^{-3}$). For spruces, the highest wood density is observed in wet mineral soil forests ($545.6 \pm 8.4 \text{ kg m}^{-3}$); in its turn, that for aspen in drained mineral soil forests ($532.3 \pm 5.9 \text{ kg m}^{-3}$).

5. Tensile strength index for the aspen hybrid non-beaten Kraft pulp handsheet is in the range from 27.2 to 34.9 Nm g⁻¹ and burst index is in the range from 0.68 to 0.93 kPa m² g⁻¹, which can compete even with coniferous wood pulp.

6. A tendency is observed that samples with a higher content of chemically pure cellulose in wood, which reaches $52.2 \pm 0.3 \%$ and $51.4 \pm 0.3 \%$, respectively, can be obtained in drained mineral soil and dry site forests; in its turn, a lower content of cellulose is in forestries and plantations arranged on agricultural lands. In the case of the analysed sample trees, the forest growth conditions have influenced the content of extractives in wood.

7. The young (9 ± 2 years) aspen hybrids grown in plantations show similar contents of cellulose in wood ($52.2 \pm 0.4 \%$) than the Common aspen ($52.2 \pm 0.6 \%$) grown for a longer time (44 ± 18 years) on the dry site. Aspen hybrids with a great wood increment and a high content of cellulose are promising trees, which can be cultivated in Latvia so that, to a certain extent, to compete with the eucalyptus grown in the South.

8. The wood analysis device „SilviScan” is an efficient instrument in the cases when the tree growth „history” is to be elucidated and the purposeful cultivation of trees for definite needs and application types, for example, developing hybrids (e.g. cultivation of plantation trees for industrial needs) is carried out.

9. Ash content is elevated for the trees, which grew in the former agricultural land areas; hence, it could be considered that the trees have taken more mineral and microelements from the soil.

Recommendations

The above-mentioned conclusions make it possible to advance the following proposals:

1. Owing to the relatively short stand rotation of the tree species, and the high mechanical strength of Kraft pulp fibres, it can be recommended to use aspen hybrid clones from Latvian State Forestry Research Institute “Silava” and AS „Latvian State Forests” plant nurseries and adopted Lodgepole pine stands.

2. It can be recommended establish a 8 – 10-year long aspen hybrid stand rotation cycle, since mechanically strong wood fibres are formed within this period of time, and it is also possible to gain the highest benefits in terms of the forest owners’ income. A circumstance should be also mentioned that, for the tree species that are unstable against fungal damages (as it is characteristic for aspen and aspen hybrids), the shorter rotation cycle means also potentially less fungus-induced damages (shorter rot fungi exposition time to harm the tree – losses of quality).

3. The studies to elucidate the effect of microfibrils’ angle changes on the quality of forest thinners should be continued. It is necessary also to elucidate, how the changes in the cell wall geometrical parameters (wall thickness, lumen area, their interrelationships) influence the mechanical properties of wood. Hence, it would be desirable, applying purposeful forestry measures, to produce wood with a quality necessary for a definite product.