

Latvijas Valsts mežzinātnes institūts “Silava”
Latvian State Forest Research Institute “Silava”

Latvijas Lauksaimniecības universitāte
Latvia University of Life Sciences and Technologies

Mg. silv. Santa Kalēja

**MAŠINIZĒTAS ENERĢĒTISKĀS KOKSNES
SAGATAVOŠANAS TEHNOLOĢISKIE UN
EKONOMISKIE RISINĀJUMI STARPCIRTĒ**

***TECHNOLOGICAL AND ECONOMIC SOLUTIONS OF
MECHANISED FOREST BIOFUEL PRODUCTION IN
THINNING***

Promocijas darba KOPSAVILKUMS
Zinātniskā doktora grāda **zinātnes doktors (Ph. D.)** Lauksaimniecības un
zivsaimniecības zinātnēs, **mežzinātnē** iegūšanai

SUMMARY
*of the Doctoral thesis for the doctoral degree **Doctor of Science (Ph. D.)** in
Agriculture, **Forestry and Fisheries***

Salaspils
2020

Promocijas darba zinātniskie vadītāji / *Supervisors:*
Dr. silv. Andis Lazdiņš, Dr. sc. ing. Ziedonis Sarmulis

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Valsts mežzinātnes institūtā “Silava”, doktorantūras studijas Latvijas Lauksaimniecības universitātes Meža fakultātē laikā no 2012. līdz 2017. gadam / *The doctoral thesis is designed at the Latvian State Forest Research Institute “Silava” and Latvia University of Life Sciences and Technologies, Forest Faculty in period from 2012 to 2017.*

Oficiālie recenzenti / *Official reviewers:*

- Dr. silv. Jurģis JANSONS, Latvijas Valsts mežzinātnes institūts “Silava” vadošais pētnieks / *Senior researcher of Latvian State Forest Research Institute “Silava”, Latvia;*
- Dr. silv. Linards SISENIS, Latvijas Lauksaimniecības universitātes profesors un vadošais pētnieks / *Professor and Senior researcher of Latvia University of Life Sciences and Technologies, Latvia;*
- PhD. Peeter MUISTE, Igaunijas Dzīvības zinātnu universitātes profesors / *Professor of Estonian University of Life Sciences.*

Promocijas darba aizstāvēšana notiek Latvijas Lauksaimniecības universitātes “Lauksaimniecība un zivsaimniecības zinātnes, mežzinātne” specjalizācija “Mežzinātne” promocijas padomes sēdē 2020.gada 30.decembrī plkst. 10:00, Salaspili, Rīgas ielā 111, LVMI “Silava”bibliotēkā. *The public defense of doctoral theses in open session of the Promotion Council of Agricultural and fisheries sciences, forestry with specialization in forestry of Latvia University of Life Sciences and Technologies will be held December 30, 2020 at 10:00 am in Salaspils, Rīga Street 111, Latvian State Forest Research Institute “Silava” library.*

Ar promocijas darbu un kopsavilkumu var iepazīties LLU fundamentālajā bibliotēkā Jelgavā, Lielā ielā 2 un interneta vietnē: <https://llufb.llu.lv> / *The thesis are available at the Fundamental Library of Latvian University of Life Sciences and Technologies: Lielā Street 2, Jelgava and website <https://llufb.llu.lv>.*

Atsauksmes sūtīt promocijas padomes sekretārei Mg.silv. Sarmītei Berņikovai - Bondarei uz adresi: Dobeles iela 41, Jelgava, LV-3001, Latvija vai e-pastā koka@llu.lv / *References are welcome to be sent to Mg.silv. Sarmītei Berņikovai - Bondarei the secretary of the Promotion Counci, address: Dobeles iela 41, Jelgava, LV-3001, Latvia or by email koka@llu.lv.*

SATURA RĀDĪTĀJS

1.	DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS	5
1.1.	Tēmas aktualitāte	5
1.2.	Promocijas darba mērķis, uzdevumi un tēze.....	5
1.3.	Darba zinātniskā novitāte un praktiskā nozīme	6
1.4.	Zinātniskā darba aprobācija	6
1.5.	Promocijas darba struktūra un apjoms	8
2.	MATERIĀLS UN METODES	9
2.1.	Enerģētiskās koksnes resursu pieejamības noteikšana.....	9
2.2.	Pētījuma objektu apraksts	9
2.3.	Pētījumā izmantotās meža tehnikas apraksts	10
2.4.	Pētījumā izmantoto darba metožu apraksts.....	10
2.5.	Mašinizētas starpcirtes darba laika uzskaite un ražīguma rādītāju aprēķināšana	11
2.6.	Enerģētiskās koksnes ražošanas izmaksu aprēķināšana.....	11
3.	REZULTĀTI UN TO ANALĪZE	12
3.1.	Starpcirtēs pieejamie resursi un to izvērtējums.....	12
3.2.	Mašinizētas starpcirtes ražīguma rādītāji	16
3.2.1.	<i>Sagatavoto kokmateriālu raksturojums</i>	16
3.2.2.	<i>Mežizstrādes mašīnu vidējie ražīguma rādītāji</i>	18
3.2.3.	<i>Darba metodes ietekme uz ražīguma rādītājiem</i>	21
3.2.4.	<i>Operatora ietekme uz ražīguma rādītājiem</i>	26
3.3.	Mašinizētas starpcirtes ekonomiskā efektivitāte	32
	SECINĀJUMI	38
	PATEICĪBAS	40
1.	GENERAL DESCRIPTION OF THE THESIS	41
1.1.	Relevance of the topic	41
1.2.	The aim, tasks and thesis of the Doctoral Thesis	41
1.3.	Scientific novelty and practical significance of the Doctoral Thesis	42
1.4.	Approbation of research results	42
1.5.	Structure and volume of the Doctoral Thesis	43
2.	MATERIALS AND METHODS	43
2.1.	Determining the availability of wood biofuel resources	43
2.2.	Description of research objects	44
2.3.	Description of the forest machinery used in the research	44
2.4.	Description of working methods used in the research	45
2.5.	Accounting of mechanized thinning work time and calculation of productivity indicators	45
2.6.	Calculation of wood biofuel production costs	46
3.	RESULTS AND DISCUSSION	47
3.1.	Evaluation availability of wood biofuel resources	47
3.2.	Productivity indicators of mechanized thinning	50
3.2.1.	<i>Characteristics of prepared timber</i>	50

<i>3.2.2. Average productivity of harvesters</i>	51
<i>3.2.3. Influence of the working method on productivity indicators.....</i>	52
<i>3.2.4. Influence of harvester operator on productivity indicators</i>	53
<i>3.3. Economic efficiency of mechanized thinning.....</i>	55
CONCLUSIONS	58

1. DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS

1.1. Tēmas aktualitāte

Jau vēsturiski īpašnieki apsaimniekojuši mežu tā, lai nodrošinātu ilgtspējīgu resursu pieejamību un iegūtu saimnieciski nozīmīgākos meža produktus – apalos kokmateriālus. Augošais pieprasījums pēc koksnes produktiem liek meklēt aizvien jaunus, zinātniski un praktiski pamatotus risinājumus mežsaimniecības prakses pilnveidošanai un koksnes piegāžu uzlabošanai. Enerģētiskā koksne ir viens no atjaunojamo energoresursu (AER) veidiem Latvijā, kam joprojām ir vislielākais izmantošanas pieauguma potenciāls. Izmaiņas koksnes izmantošanas pieejā varētu sekmēt Latvijas enerģētikas attīstību, sasniedzot Latvijas ilgtspējīgas attīstības stratēģijā līdz 2030. gadam izvirzītos mērķus, kas saistīti ar enerģijas, kas saražota, izmantojot AER, īpatsvara palielinājumu līdz 40% no bruto enerģijas gala patēriņa. Līdzšinējie pētījumi parāda, ka vislielākie starpcirtēs teorētiski iegūstamie neizmantotie enerģētiskās koksnes krājumi atrodami audzēs, kuru vecums ir no 21 līdz 30 gadiem. Tā kā šo resursu izmantošanā iespējami dažādi tehniskie un tehnoloģiskie risinājumi, pirms ražošanas uzsākšanas svarīgi izvērtēt ne vien teorētisko, bet arī tehnoloģisko un ekonomisko resursu pieejamību. Starpciršu, kas saistīta galvenokārt ar enerģētiskās koksnes ieguvi, mašinizāciju kavē ekonomiskie faktori. Līdzšinējie pētījumi Ziemeļvalstīs pierādījuši, ka līdzīga izmēra un jaudas mežizstrādes mašīnu ražīguma rādītāji, kas sasniegti, strādājot līdzīgos apstākļos, būtiski neatšķiras, kas ļauj domāt, ka mašinizētās starpcirtēs enerģētiskās koksnes ražošanā iespējams izmantot vidējās klases mežizstrādes mašīnas, ko Latvijā šobrīd plaši izmanto galvenās cirtes cirsmu izstrādē. Pētījuma aktualitāti nosaka tas, ka joprojām ir neatbildēts jautājums par piemērotāko tehnisko un tehnoloģisko risinājumu enerģētiskās koksnes ieguvē mašinizētā starpcirtē, izvērtējot mašīnu ražīgumu ietekmējošos faktorus, kā arī vērtējot mašinizētu starpciršu ekonomisko izdevīgumu.

1.2. Promocijas darba mērķis, uzdevumi un tēze

Promocijas darba mērķis ir izpētīt enerģētiskās koksnes sagatavošanas ražīgumu un ražošanas izmaksas ietekmējošos faktorus, kā arī novērtēt koksnes resursus mežaudzēs, kurās nav savlaicīgi veikta jaunaudžu kopšanas cirte.

Promocijas darbā izvirzītā mērķa sasniegšanai un izvirzītās tēzes pārbaudei noteikti sekkojoši pētnieciskie uzdevumi:

- 1) noskaidrot savlaicīgi neizkoptās jaunaudzēs pieejamos koksnes resursus un tehnoloģiski pieejamos enerģētiskās koksnes resursus Latvijā;

- 2) izpētīt faktorus, kas ietekmē meža darbu ražīgumu un enerģētiskās koksnes ražošanas pašizmaksu mašinizēti un ar rokas motorinstrumentiem izstrādātās starpcirtes cirsmās;
- 3) novērtēt dažādu starpcirtes mašinizācijas risinājumu ietekmi uz enerģētiskās koksnes sagatavošanas rentabilitāti.

Promocijas darbā izvirzīta sekojoša tēze: mežaudzēs, kurās nav savlaicīgi veikta jaunaudžu kopšanas cirte, mašinizēta starpcirte, gatavojot enerģētisko koksni, var būt rentabla.

1.3. Darba zinātniskā novitāte un praktiskā nozīme

Kaut arī enerģētiskā koksne, kas iegūstama veicot mašinizētas starpcirtes, ir viens no atjaunojamo energoresursu veidiem Latvijā, kura izmantošanai joprojām ir potenciāls, ražošanas izmaksas ir salīdzinoši lielas un kavē resursa izmantošanu. Lai efektīvi apgūtu resursu, nepieciešams rast piemērotāko tehnoloģisko un ekonomiski pamatošāko risinājumu. Latvijā šobrīd cirsmu darbu izmaksu kalkulācijā netiek izmantots vienots izmaksu aprēķinu modelis. Parasti ražošanas izmaksu aprēķinus veic katrs pakalpojumu sniedzējs katrai no mežizstrādes tehnoloģiskā procesa fāzēm.

Pētījumā iegūtie rezultāti sniedz ieskatu mašinizētu starpciršu tehnoloģiskajos risinājumos un darba metodēs meža platībās, kurās galvenokārt iegūst tikai enerģētisko koksni. Izmaksu aprēķina modelis, kas pētījuma ietvaros papildināts un pielāgots izmaksu aprēķināšanai cirsmu darbos, sniedz iespēju veikt enerģētiskās koksnes ražošanas ekonomisko izvērtējumu, kā arī ļauj aprēķināt mežizstrādes tehnoloģiskā procesa kopējās izmaksas.

Pētījumi šajā virzienā sniedz plašāku priekšstatu par to, kādi faktori jāizvērtē rūpīgāk un kam jāpievērš lielāka uzmanība, lai enerģētiskās koksnes ieguvi mašinizētā starpcirtē padarītu vēl efektīvāku gan no mežsaimnieciskā, gan ekonomiskā viedokļa. Izmantojot promocijas darbā iekļauto ražošanas izmaksu aprēķina modeli, aprēķinātie lielumi ir salīdzināmi un vērtējami katrā no izmaksu pozīcijām, kas sniedz iespēju identificēt pozīcijas, kuras, mainot vai pielāgojot tehnoloģiju, būtu iespējams samazināt.

1.4. Zinātniskā darba aprobatācija

Pētījuma rezultāti apkopoti sešās publikācijās starptaustiskos un vietējos zinātnisko rakstu krājumos.

1. **Kaleja, S., Lazdins, A., Zimelis, A. (2019). Comparison of costs in pre-commercial thinning using medium-sized and small-sized harvesters.**

Proceedings of the 9th International Scientific Conference Rural Development 2019. 253-259. DOI: <http://doi.org/10.15544/RD.2019.055>.

2. **Kalēja, S.**, Lazdiņš, A., Zimelis, A., Spalva, G. (2017). Model for cost calculation and sensitivity analysis of forest operations. *Agronomy Research*, 16(5), 2068–2078. DOI:10.15159/AR.18.207.
3. Prindulis, U., **Kaleja, S.**, Lazdins, A. (2016). Soil compaction in young stands during mechanized logging of biofuel and roundwood assortments. *Research for Rural Development. International Scientific Conference Proceedings*, 2. 69–76. Pieejams: http://www2.llu.lv/research_conf/proceedings2016_vol_2/docs/LatviaResRuralDev_22nd_vol2-69-76.pdf.
4. **Kaleja, S.**, Lazdins, A., Zimelis, A. (2014). Impact of assortments structure on harvesting productivity and costs of pre-commercial thinning. *Research for Rural Development. International Scientific Conference Proceedings*, 2. 83–90. Pieejams: http://www2.llu.lv/research_conf/Proceedings/20th_volume2.pdf.
5. **Kalēja, S.**, Grīnfelds, A., Lazdiņš, A. (2013). Economic value of wood chips prepared from young stand tending. *Annual 19th International Scientific Conference Proceedings*, 2. 66–73. Pieejams: http://www2.llu.lv/research_conf/Proceedings/19th_volume2.pdf.
6. Lazdiņš, A., **Kalēja, S.**, Gruduls, K., Bārdulis, A. (2013). Theoretical evaluation of wood for bioenergy resources in pre-commercial thinning in Latvia. *Annual 19th International Scientific Conference Proceedings*, 2. 42–49. Pieejams: http://www2.llu.lv/research_conf/Proceedings/19th_volume2.pdf.

Pētījuma rezultāti prezentēti septiņās starptautiskās un vietējās nozīme zinātniskajās konferencēs.

1. 9th International Scientific Conference “Rural Development 2019: Research and Innovation for Bioeconomy”, 26.-28.09.2019., Kauņa, Lietuva. Prezentācija – **Kalēja, S.**, Lazdiņš, A., Zimelis, A. Comparison of costs in pre-commercial thinning using medium-sized and small-sized harvesters.
2. Biosystems Engineering 2018, 09. – 11.05.2018., Tartu, Igaunija. Stenda referāts – **Kalēja, S.**, Lazdiņš, A., Zimelis, A., Spalva, G. The model for calculation of forest operations cost and sensitivity analysis.
3. Annual 24th International Scientific Conference “Research for Rural Development 2018”, 16.-18.05.2018., Jelgava, Latvija. Prezentācija – Zimelis, A., **Kalēja, S.**, Luguza, S. Factors affecting productivity of machined logging in thinning small sized forest machine.
4. Nordic Baltic Conference OSCAR14, 25.-27.06.2014., Knivsta, Zviedrija. Prezentācija – **Kalēja, S.**, Lazdiņš, A. Assessment of used work methods and environmental impact to young stand tending with timber harvarder.

5. Nordic Baltic Conference OSCAR14, 25.-27.06.2014., Knivsta, Zviedrija. Prezentācija – Lazdiņš, A., **Kalēja, S.**, Zimelis A. Results of evaluation of Bracke C16.b working methods in coniferous and mixed stands.
6. Annual 20th International Scientific Conference “Research for Rural Development 2014”, 21.-23.05.2014., Jelgava, Latvija. Prezentācija – **Kalēja, S.**, Lazdiņš, A., Zimelis, A. Impact of assortments structure on harvesting productivity and costs of per-commercial thinning.
7. Annual 19th International Scientific Conference “Research for Rural Development 2013”, 15.-17.05.2013., Jelgava, Latvija. Prezentācija – **Kalēja, S.**, Grīnfelds, A., Lazdiņš, A. Economic value of wood chips prepared from young stand tending.

1.5. Promocijas darba struktūra un apjoms

Promocijas darba struktūra veidota saskaņā ar darbā izvirzītajiem pētnieciskajiem uzdevumiem. Darbu veido trīs nodaļas, no kurām pirmajā – atspoguļots problēmas izziņābas apraksts citu autoru veiktajos pētījumos un gūtās atzinās; sniegs ieskats enerģētiskās koksnes resursu pieejamībā Latvijā un iespējām šos resursus izmantot; apskatīta mežizstrādes darbu organizācijas un izmantoto tehnoloģiju vēsture, kā arī mašinizētas mežizstrādes iespējas mūsdienās; raksturoti līdzšinējie sasniegumi, veicot mašinizētas starpcirtes, kā arī apzināti mašinizētas mežizstrādes ražīgumu ietekmējošie faktori; apskatīta enerģētiskās koksnes loma atjaunojamo energoresursu kontekstā un šī resursa nozīme tautsaimniecībā. Otrajā nodaļā aprakstīta enerģētiskās koksnes teorētiski, tehniski un tehnoloģiski pieejamo resursu noteikšanas metodika; raksturoti pētījuma objekti, kā arī parauglaukumu ierīkošana un datu ievākšanas metodika tajos; sniegs mašinizētā starpcirtē izmantoto mežizstrādes mašīnu apraksts, izvēlēto darba metožu un apstākļu raksturojums, kā arī izmēģinājumu laikā iegūto datu apkopošanas un analīzes metodes; raksturots enerģētiskās koksnes ražošanas izmaksu aprēķinu modelis, kas pētījuma ietvaros pielāgots mežizstrādes tehnoloģiskajiem procesiem Latvijā. Trešajā nodaļā veikts enerģētiskās koksnes resursu novērtējums; izvērtēti ražīguma rādītāji, kas iegūti mašinizētā starpcirtē, un apzināti faktori, kas to būtiski ietekmē; veikts enerģētiskās koksnes ražošanas izmaksu izvērtējums.

Promocijas darba apjoms ir 72 lappuses; informācija apkopota 23 tabulās un 24 attēlos, izmantoti 95 literatūras avoti, darba noslēgumā formulēti 7 secinājumi un pievienoti 9 pielikumi.

2. MATERIĀLS UN METODES

2.1. Enerģētiskās koksnes resursu pieejamības noteikšana

Resursu teorētiskās, tehniskās un tehnoloģiskās pieejamības izvērtējumā izmantoti Meža statistiskās inventarizācijas (MSI) 3. cikla (2014–2019) dati, kas iegūti meža platībās ar 9 –12 m augstiem kokiem. Apstrādei un aprēķiniem atlasīti rādītāji, kas iegūti meža zemēs un ar mežu klātās lauksaimniecības zemēs izvietotos parauglaukumos.

Šajā pētījumā ar teorētiski pieejamajiem enerģētiskās koksnes resursiem saprot resursus, kas pieejami mežaudzēs, kurās koku skaits vai šķērslaukums pēc plānoto tehnoloģisko koridoru ierīkošanas nesamazinās zem minimālā koku skaita vai šķērslaukuma. Teorētiski resursi pieejami arī aizsargājamās dabas teritorijās.

No teorētiski pieejamajiem resursiem aprēķinot tehniski pieejamos resursus, tālākos aprēķinos nav iekļautas meža platības, kurās, vadoties no meža tipa, resursu iegūšana starpcirtē nav ieteicama: sils (*Cladinoso-callunosa*), viršu kūdrenis (*Callunosa turf. mel.*) un viršu ārenis (*Callunosa mel.*), kā arī koksnes ieguvvi parasti neveic vai arī enerģētiskās koksnes savākšanu no koksnes ieguvves tehnoloģiskā viedokļa grūti realizēt: purvaiņi, grīnis (*Cladinoso-sphagnosa*), slapjais mētrājs (*Vaccinioso-sphagnosa*). Tāpat no aprēķina izslēgtas aizsargājamās dabas teritorijas (Lazdiņš et al., 2012).

Tehnoloģiski pieejamo resursu aprēķinā izmantoti tehniski pieejamie resursi, atņemot ražošanas zudumus (30 % ciršanas atliekām un 5 % malkai, Adamovičs et al., 2009), kā arī atsevišķi izdalīti resursi, kas iegūstami ziemas periodā (Lazdiņš et al., 2012).

2.2. Pētījuma objektu apraksts

Saskaņā ar pētījuma mērķi un izvīrzītajiem darba uzdevumiem, empīriskā materiāla ievākšanai izvēlētas 10 mežaudzes valsts mežos ar kopējo platību 27.8 ha. Izmēģinājuma objekti koncentrēti Latvijas centrālajā daļā (Vidusdaugavas reģionā). Par audžu atlases kritērijiem noteikti valdaudzes videjā koka augstums (9 - 12 m) un audzes biezums (koku skaits ≥ 2000 gab. ha^{-1}). Izmēģinājumiem par piemērotām atlasiņas 3 lapkoku audzes – kārpainais bērzs (*Betula pendula* Roth) un 7 skujkoku audzes – parastā egle (*Picea abies* (L.) H. Karst.) un parastā priede (*Pinus sylvestris* L.).

Empīriskais materiāls pētījuma veikšanai ievākts no 2013. līdz 2014. gadam.

Visas atlasiņas audzes izzāgētas līdz minimālajam koku skaitam vai šķērslaukumam, veicot “apakšējo kopšanu”, kas paredz sākotnēji nozāgēt mazāko dimensiju un neperspektīvos kokus.

Tehnoloģiskie koridori ierīkoti 15,18, 20 vai 30 m attālumā viens no otru. Atkarībā no mežizstrādes mašīnas gabarītiem un izlices snieguma, atsevišķās

audzēs izzāgētas 1 vai 2 “slēptās brauktuves”, kas paredzētas, lai mežizstrādes mašīna pārvietotos pa neizstrādāto joslas daļu starp tehnoloģiskajiem koridoriem.

2.3. Pētījumā izmantotās meža tehnikas apraksts

Pētījuma ietvaros mašinizētas starpcirtes veiktas, izmantojot trīs dažādas mežizstrādes mašīnas, kuru darba galvas papildus aprīkotas ar stumbru uzkrāšanas mehānismiem.

Ar vidējās klases mežizstrādes mašīnu John Deere 1070 E (pašmasa 15.5 t, dzinēja jauda 136 kW pie 1900 apgriezieniem min.⁻¹), kas aprīkota ar H 754 darba galvu (masa 820 kg, maksimālais apstrādājamā stumbra caurmērs 55 cm, griezējmehānisms – ķedes tipa zāgis, 5 kustīgie naži, 1 fiksētais nazis, 4 padeves veltņi, maksimālā strēles izlice 10 m), pētījuma ietvaros iegūti darba laika uzskaites dati par 127 darba stundām.

Ar vidējās klases mežizstrādes mašīnu John Deere 1070 D (pašmasa 14.1 t, dzinēja jauda 136 kW pie 1900 apgriezieniem min.⁻¹), kas aprīkota ar Bracke C16.b darba galvu (masa 570 kg, maksimālais apstrādājamā stumbra caurmērs 26 cm, griezējmehānisms – uz diska montēta zāga ķede, maksimālā strēles izlice 10 m), pētījuma ietvaros iegūti darba laika uzskaites dati par 66 darba stundām.

Ar mazās klases mežizstrādes mašīnu Rottne H8 (pašmasa 10.2 t, dzinēja jauda 125 kW pie 2000 apgriezieniem min.⁻¹), kas aprīkota ar EGS 406 darba galvu (masa 480 kg, maksimālais apstrādājamā stumbra caurmērs 33 cm, griezējmehānisms – ķedes tipa zāgis, 2 kustīgie naži, 2 padeves veltņi, maksimālā strēles izlice 7 m), pētījuma ietvaros iegūti darba laika uzskaites dati par 262 darba stundām.

2.4. Pētījumā izmantoto darba metožu apraksts

Izmēģinājumos izmantotas 2 darba metodes. Abas metodes paredz atstāt pameža kokus, ja vien tie netraucē mežizstrādes procesu. Tāpat, neatkarīgi no metodes izvēles, zāgējot kokus, kas nav paredzēti standarta apaļo kokmateriālu gatavošanai, maksimāli izmanto stumbru uzkrāšanas ierīci. Ar jēdzienu “daļēji atzarota sīkkoksnes” saprot enerģētisko koksni (ne garāku par 6 m), kas gatavota no neatzarotām galotnēm, mežizstrādes atliekām un pameža kokiem, kuru krūšaugstuma caurmērs ($D_{1,3}$) < 6 cm.

Pirmā no izmantotajām darba metodēm paredz gatavot visus apaļos kokmateriālus atbilstoši AS „Latvijas valsts meži” produktu grupām, kā arī daļēji atzarotas sīkkoksnes sortimentu (garums 2.5-3 m, minimālais tievgaļa caurmērs 3 cm).

Otrā darba metode paredz no visiem nozāģētajiem kokiem, izņemot pamēža kokus, kuru $D_{1,3} < 4$ cm, gatavot daļēji atzarotu enerģētisko koksni.

2.5. Mašinizētas starpcirtes darba laika uzskaitē un ražīguma rādītāju aprēķināšana

Starpcirtes darba laika izlietojuma izpētei izmantota hronometrāzas metode, kas ir tiešā laika izlietojuma fiksēšanas metode un paredzēta darba procesa pamatelementu ilguma un secības fiksācijai pie to cikliskas atkārtošanās. Darba elementu ilguma noteikšanai veikta nepārtraukta hronometrāza, kas piemērota darba operācijas elementu, kuru ilgums nav mazāks par 10 sekundēm, izpētei (Bludinš & Rudze, 1979). Hronometrāzas laikā mežizstrādes mašīnu darba laiks pielāgots motorstundu uzskaitei, dzinēja noslāpēšanas brīdī apturot hronometrāžu un atsākot to, tiklīdz dzinējs atkal iedarbināts.

Darba laika patēriņš noteikts katram darba ciklam atsevišķi, fiksējot cikla numuru. Veicot darba laika uzskaitīt, papildus lauka datorā aizpildīti informatīvie lauki, kas sniedz ziņas par nozāģētā koka vidējo caurmēru zāģējuma vietā (D_0), izmantojot Rottne H8, vai krūšaugstuma caurmēru ($D_{1,3}$), izmantojot John Deere mežizstrādes mašīnu. Tāpat aizpildīti informatīvie lauki par vienā darba ciklā apstrādāto koku skaitu, veiktas atzīmes par pārtraukumiem darbā, mašīnas veiktajiem pārbraucieniem uz citu tehnoloģisko koridoru, kā arī identificēts operators, kurš veicis mežizstrādi.

Ražīguma rādītāji aprēķināti no darba laika uzskaites datiem iedalījumā pa cirsmām, tehnikas vienībām, darba metodēm un operatoriem.

Mežizstrādes mašīnu darba dienas (maiņas) laika izlietojums jeb kopējais darba laiks ietver visu pētījuma ietvaros uzskaitīto darba laiku, kad mašīnas dzinējs darbojies. Efektīvais darba laiks veidojas, no kopējā darba laika atņemot neefektīvo darba laiku, ko attiecīgi veido remontam (pie nosacījuma, ka darba laika uzskaites brīdī mežizstrādes mašīnas dzinējs turpina darboties) un ar tiešo darbu nesaistītām darbībām patērētais laiks.

2.6. Enerģētiskās koksnes ražošanas izmaksu aprēķināšana

Izmaksu aprēķināšanai izmantots COST projekta FP0902 aktivitātes ietvaros (Ackerman et al., 2014) izstrādāts modelis, kas šī pētījuma ietvaros papildināts ar standarta ekonomiskajām metodēm un pielāgots izmaksu aprēķināšanai cirsmu darbos, kā arī sagatavoto materiālu izvešanai, aptverot visu mežizstrādes tehnoloģisko procesu (Kalēja et al., 2018a).

Kalkulācijas modelī izmaksas sadalītas pa to veidiem jeb izmaksu posteņiem uz produkta vai pakalpojuma vienību (Alsiņa et al., 2011). Ražošanas izmaksu aprēķinā iekļautas gan tiešas ražošanas izmaksas, kas ir tieši saistītas ar konkrētu izmaksu objektu radīšanu, izmaksu procesu un aktivitāti, gan vispārējās jeb

netiesās izmaksas, kas nav tieši saistītas ar konkrētās produkcijas ražošanu, bet ir nosacīti saistītas ar ražošanas procesu un tiek ieskaitītas ražošanas pašizmaksā, izmantojot pieskaitījuma likmi (Vītola & Soopa, 2002; Alsiņa et al., 2011). Netiešo izmaksu noteikšana un sadalīšana pa kalkulāciju objektiem veikta atbilstoši saražotās produkcijas apjomam vai laika periodam.

Ražošanas izmaksu kalkulācijā izmantoti empīriskie dati, kas iegūti ilglaicīgos novērojumos (tehnikas pakalpojumu sniedzēju un servisa kompāniju sniegtā informācija par tehnikas uzturēšanas izmaksām), un publicēti dati, kas ietver tehnikas izmaksu analīzi. Izmaksu posteņus veido ieguldījumu izmaksas, personāla izmaksas un operacionālās jeb uzturēšanas izmaksas (Brinker et al., 2002; Alsiņa et al., 2011; Ackerman et al., 2014).

Lai iespējami precīzāk aprēķinātu mežizstrādes tehnoloģiskā procesa izmaksas un izmaksu modelis būtu piemērots dažādiem apstākļiem, aprēķinos izmantoti tādi specifiski rādītāji, kā mašīnu ražīgums un to ietekmējošie faktori – vidējā nozāģētā koka caurmērs, nozāģēto koku skaits, vidējās kravas lielums, tehnikas pārbraucienu skaits gadā, vidējais izvešanas ceļa garums, vidējais pārvietošanās ātrums.

Kubikmetra (m^3) pārrēķiniem berkubikmetros (ber. m^3) izmanto koeficientu 2.5. Kravas lielums iegūts, veicot kravu svērumus, vai arī aprēķināts, par pamatu nēmot sagatavoto kokmateriālu dimensijas.

Ražošanas izmaksu aprēķina modelis paredzēts stundu (efektīvās stundas, motorstundas un plānotās darba stundas) un vienības izmaksu aprēķināšanai katrai no mežizstrādes tehnoloģiskā procesa fāzēm vai mežizstrādes tehnoloģiskajam procesam kopumā.

3. REZULTĀTI UN TO ANALĪZE

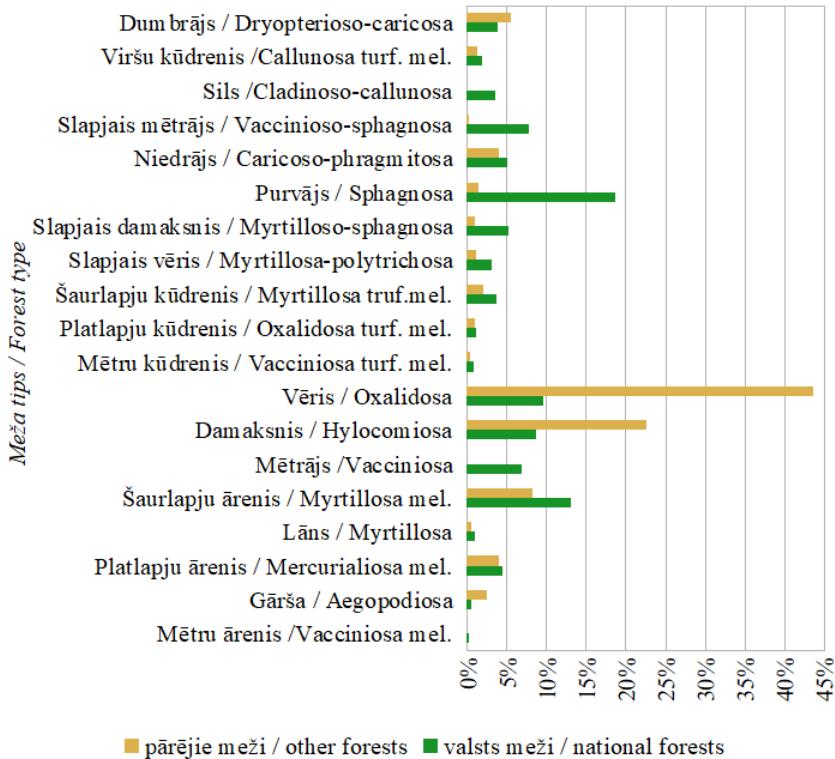
3.1. Starpcirtēs pieejamie resursi un to izvērtējums

Saskaņā ar MSI 3. cikla (2014–2019) datiem meža platības, kuru valdaudzēs koku augstums ir 9 – 12 m, aizņem 7% (234 tūkst. ha ar kopējo stumbru krāju 15 524 tūkst. m^3) no kopējām meža platībām valstī. Lielākā daļa jeb 63% (149 tūkst. ha) šādu mežaudžu atrodas pārējo īpašnieku mežos.

Aprēķini parāda, ka starpcirtē teorētiski pieejamie enerģētiskās koksnes resursi, kas koncentrēti meža platībās, kurās koku skaits vai šķērslaukums pēc plānoto tehnoloģisko koridoru ierīkošanas nesamazinās zem minimālā koku skaita vai šķērslaukuma, veido 7054 tūkst. m^3 stumbru koksnes (4091 tūkst. $t_{sausnas}$ virszemes biomasas, no kurās valsts mežos atrodas vien 27% (1927 tūkst. m^3 stumbru koksnes vai 1109 tūkst. $t_{sausnas}$ virszemes biomasas), bet pārējos mežos teorētiski pieejami 5127 tūkst. m^3 stumbru koksnes vai 2982 tūkst. $t_{sausnas}$ virszemes biomasas.

Kopējais teorētiskais koku virszemes biomasas apjoma sadalījums pa meža tipiem (saskaņā ar MSI 3. cikla datiem) pievienots 3.1. att. Lielākā daļa (59%)

no kopējiem teorētiski pieejamajiem koku virszemes biomasas resursiem atrodas sausieņos. Valsts mežos sausieņos atrodas 30% no kopējiem resursiem, bet pārējās meža platībās – 69%. Silā (*Cladinoso-callunosa*), kur atrodas 4% no valsts mežos teorētiski pieejamajiem enerģētiskās koksnes resursiem, to ieguve starpcirtēs nav ieteicama, ierobežojot organisko vielu iznesi no meža (Skudra & Dreimanis, 1993). Meža platībās, kas nav valsts meži, silā (*Cladinoso-callunosa*) un mētrājā (*Vacciniosa*) nav pieejami resursi, kas būtu izmantojami enerģētiskās koksnes ražošanai. No augsnes nestspējas viedokļa sausieņi ir piemēroti mašinizētai mežizstrādei neatkarīgi no gadalaika (Saliņš & Rasnacis, 1985; Saliņš, 1987; Zālītis & Jansons, 2013; Liepa et al., 2014;). Purvaiņos atrodas 16% no kopējiem resursiem, attiecīgi 28% no enerģētiskās koksnes resursiem atrodas valsts mežos, bet 11% pārējo īpašnieku mežos. Liekņā (*Filipendulosa*) nav teorētiski pieejamo resursu enerģētiskās koksnes ražošanai. Kaut gan purvaiņu meža tipos koncentrēto resursu īpatsvars ir salīdzinoši liels, apstākļi nav piemēroti mašinizētai starpcirtei augstā gruntsūdens līmeņa dēļ (Saliņš, 1987; Liepa et al., 2014). Āreņos enerģētiskās koksnes resursi veido 14% no kopējiem teorētiski pieejamajiem resursiem, attiecīgi 18% (valsts mežos) un 12% (pārējos mežos). Viršu ārenī (*Callunosa mel.*) nav sastopamas meža platības ar 9–12 m augstiem kokiem, kurās teorētiski varētu iegūt enerģētiskās koksnes resursus, savukārt mētru ārenī (*Vacciniosa mel.*) resursi pieejami vien valsts mežu platībās. No augsnes nestspējas viedokļa, mašinizētu starpcirti var veikt gan vasarā, gan ziemā (Saliņš et al., 1987; Liepa et al., 2014). Slapjaņos koncentrētie teorētiskie enerģētiskās koksnes resursi (veido 6% no kopējiem) atrodas 16% valsts mežos un 2% pārējās meža platībās. Grīni (*Cladinoso-sphagnosa*) un slapajā gāršā (*Dryopteriosa*) nav pieejami teorētiski iegūstamie enerģētiskās koksnes resursi. No augsnes nestspējas viedokļa mašinizēta starpcirte šajos mežos iespējama visos gadalaikos (Saliņš & Rasnacis, 1985; Saliņš, 1987; Liepa et al., 2014), tomēr mežus būtiski var ietekmēt klimatisko apstākļu izmaiņas, tādējādi enerģētiskās koksnes savākšanu padarot tehnoloģiski sarežģītu. Kūdreņos atrodas salīdzinoši maz (5%) no kopējā teorētiski pieejamā resursu potenciāla (8% valsts un 5% pārējo īpašnieku mežos). Viršu kūdrenis (*Callunosa turf. mel.*), kurā atrodas 1% no kopējiem teorētiski pieejamajiem resursiem, nav piemērots enerģētiskās koksnes ieguvei. Kūdreņos mašinizēta starpcirte iespējama vien ziemā, sala periodā (Saliņš et al., 1987; Liepa et al., 2014).



**3.1. att. Starpcirtē teorētiski pieejamās virszemes biomasa sadalījums pa meža tipiem platībās ar 9 līdz 12 m augstiem kokiem /
Fig. 3.1. Structure of biomass theoretically available above-ground in thinnings by forest stand type in areas with 9 to 12 m height trees**

Līdzšinējie pētījumi parāda, ka vidējā nocērtamā stumbra koksnes krāja meža platībās ar 9–12 m augstiem kokiem ir $30\text{--}50 \text{ m}^3$ (Lazdiņš et al., 2013). Saskaņā ar veiktajiem aprēķiniem, lielāka vidējā nocērtamā stumbra koksnes krāja (meža platībās izcērtot kokus līdz minimālajam koku skaitam vai šķērslaukuma) valsts mežos ir mazāka ($20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) nekā pārējos mežos ($30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). Lielākā nocērtamā stumbra koksnes krāja ($31 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) raksturīga purvaiņiem, valsts mežos tā ir $31 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ un atkarībā no meža tipa variē no $42 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ dumbrājā (*Dryopteriso-caricosa*) līdz $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ purvājā (*Sphagnosa*). Pārējās purvaiņu meža platībās vidējā krāja ir $31 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ jeb no vidēji $14 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ purvājā (*Sphagnosa*) līdz $43 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ niedrājā (*Caricoso-phragmitosa*). Tāpat salīdzinoši liela vidējā nocērtamā stumbra koksnes krāja ($26 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) raksturīga sausieņiem. Valsts mežos tā ir $17 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ jeb no vidēji $9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ gāršā (*Aegopodiumosa*) līdz

$30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ silā (*Cladinoso-callunosa*). Savukārt pārējās sausieņu meža platībās vidējā nocērtamā krāja ir $31 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ jeb no vidēji $25 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ lānā (*Myrtillosa*) līdz $35 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ vērī (*Oxalidosa*). Slapjaiņos vidējā nocērtamā stumburu koksnes krāja ir $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, valsts mežos tie ir vidēji $18 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ jeb no vidēji $8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ slapjajā gāršā (*Dryopteriosa*) līdz $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ slapjajā mētrajā (*Vaccinioso-sphagnosa*). Pārējos mežos slapjaiņos vidējā nocērtamā stumburu koksnes krāja ir $29 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, no vidēji $13 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ slapjajā vērī (*Myrtillosa-polytrichosa*) līdz $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ slapjajā gāršā (*Dryopteriosa*). Āreņos vidējā nocērtamā stumburu koksnes krāja ir $19 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Valsts mežos āreņos tie ir vidēji $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ jeb no vidēji $8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ mētru ārenī (*Vacciniosa mel.*) līdz $28 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ platlapju ārenī (*Mercurialisosa mel.*). Pārējos mežos āreņos vidējā nocērtamā krāja ir $25 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, no vidēji $22 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ šaurlapju ārenī (*Myrtillosa mel.*) līdz $28 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ platlapju ārenī (*Callunosa mel.*). Saskaņā ar veiktajiem aprēķiniem vismazākā vidējā nocērtamā stumburu koksnes krāja ($16 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) ir kūdreņos. Valsts mežos kūdreņos tie ir $19 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, no $8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ mētru kūdrenī (*Vacciniosa turf. mel.*) līdz $26 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ platlapju kūdrenī (*Oxalidosa turf. mel.*). Pārējos kūdreņu mežos nocērtamā vidējā krāja ir $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ jeb no $7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ platlapju kūdrenī (*Oxalidosa turf. mel.*) līdz $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ mētru kūdrenī (*Vacciniosa turf. mel.*).

Analizējot teorētiski pieejamos stumbra koksnes krājas resursus meža platībās ar 9–12 m augstiem kokiem, atkarībā no valdošās koku sugas, jāsecina, ka valsts mežos lielākā daļa (69%) resursu atrodas skuju koku audzēs – 45% priežu, 24% eglu audzēs. Lapu koku audzēs atrodas 31% no resursiem. Pārējos mežos teorētiski pieejamie nocērtamās stumbra koksnes resursi koncentrēti lapu koku audzēs (87%), visvairāk meža platībās, kur valdošā suga ir baltalksnis (38%). Skuju koku audzēs pārējos mežos atrodas 13% no teorētiski pieejamā resursu potenciāla.

Tehniski pieejamie enerģētiskās koksnes resursu izvērtējums parāda, ka meža platībās ar 9–12 m augstiem kokiem mašinizētā starpcirtē tehniski pieejami 757 tūkst. t ciršanas atlieku un 886 tūkst. m^3 malkas. Valsts mežos atrodas 20% no tehniski pieejamajiem resursiem, lielākā daļa resursu koncentrēta pārējos mežos (605 tūkst. t mežizstrādes atlieku un 715 tūkst. m^3 malkas).

Tehnoloģiski pieejamo resursu izvērtējums parāda, ka mašinizētā starpcirtē tehnoloģiski pieejami 530 tūkst. t ciršanas atlieku un 798 tūkst. m^3 malkas jeb kopā 4588 tūkst. MWh enerģētiskās koksnes, pārvēršot to primārajā energijā. Tikai 19% no tehnoloģiski pieejamajiem enerģētiskās koksnes resursiem koncentrēti valsts mežos. Lielākā daļa jeb 3686 tūkst. MWh tehnoloģiski pieejamās primārās energijas resursu koncentrēta pārējās meža platībās. 27% no kopējiem tehnoloģiski pieejamajiem resursiem iegūstami ziemā, un mazākā daļa (38%) no tikai ziemā iegūstamiem resursiem atrodas valsts meža platībās.

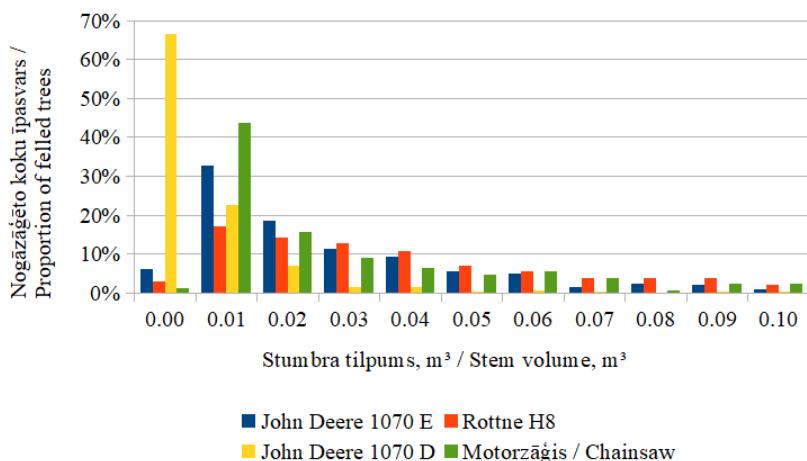
Pienēmot, ka šos resursus iegūst 5 gadu laikā, vidējais gada laikā iegūstamās primārās energijas daudzums ir 180 tūkst. MWh valstij piederošās un

737 tūkst. MWh pārējās meža platībās, neskaitot krājas pieaugumu enerģētiskās koksnes sagatavošanai piemērotajās platībās.

3.2. Mašinizētas starpcirtes ražīguma rādītāji

3.2.1. Sagatavoto kokmateriālu raksturojums

Mašinizētā starpcirtē, izmantojot John Deere 1070 E, nozāģēto koku īpatsvars, kuru stumbra tilpums nav lielāks par 0.1 m^3 , veido 94%. Darbus veicot ar Rottne H8 un John Deere 1070 D, nozāģēto koku īpatsvars (stumbra tilpums nepārsniedz 0.1 m^3) ir 82.7% un 99.8% no kopējā nozāģēto koku skaita. Salīdzinot ar datiem, kas iegūti daļēji mehanizētos kopšanas darbos, izmantojot motorzāģi, secināts, ka audzēs, kuru vidējā koka augstums ir 9–12 m, arī lielākajai daļai jeb 94.4% nozāģēto koku stumbru, tilpums nav lielāks par 0.1 m^3 (3.2. att.). Šī atziņa atbilst iepriekš veiktos pētījumos secinātajam, ka audzēm, kurās kaut kādu iemeslu dēļ nav veikta sistemātiska kopšana, raksturīgs liels sīkkoksnes īpatsvars, kas negatīvi ietekmē mežizstrādes mašīnas ražīguma rādītājus (Lazdāns et al., 2006).



3.2. att. Nozāģēto koku īpatsvara sadalījums pa stumbra tilpuma grupām /
Fig. 3.2. Relative distribution of felled trees by stem volume

Starpcirtēs nozāģēto koku dimensiju un sagatavotā kokmateriālu apjomu raksturojošie rādītāji doti 3.1. tabulā. Ar mežizstrādes mašīnu John Deere 1070 E nozāģēti 16.7 tūkst. koku, sagatavojot 591 m^3 kokmateriālu, vidējā nozāģētā koka augstums bija 12.3 m, bet stumbra $D_{1.3} = 8.8 \text{ cm}$ (vidējais stumbra tilpums 0.04 m^3). Ar mežizstrādes mašīnu Rottne H8 pētījuma ietvaros nozāģēti 17.9 tūkst. koku, sagatavojot 1089 m^3 kokmateriālu, vidējā nozāģētā koka

augstums bija 11.4 m, bet stumbra $D_{1.3} = 10.2$ cm (vidējais stumbra tilpums 0.07 m^3). Platībās, kurās izmantota mežizstrādes mašīna John Deere 1070 D, nozāgēti 13.4 tūkst. koku, sagatavojot 86 m^3 kokmateriālu, vidējā nozāgētā koka augstums bija 8.0 m, bet stumbra $D_{1.3} = 4.3$ cm (vidējais stumbra tilpums 0.01 m^3). Starpcirtē, kas veikta ar John Deere 1070 D un Bracke C.16 darba galvu, nozāgēto koku skats ir salīdzinoši liels, tomēr sagatavotais kokmateriālu apjoms ir mazs. Situāciju varētu skaidrot ar to, ka lielu īpatsvaru no nozāgētajiem kokiem veido pamežs un sīkkoki, kurus saskaņā ar darba uzdevumu nebija paredzēts zāgēt, ja vien tie netraucē darbu izpildi. Tāpat darba uzdevumā bija paredzēts kokmateriālus gatavot no kokiem, kuru $D_{1.3} > 3$ cm. Analizējot sagatavoto kokmateriālu apjomu sadalījumā pa stumbra tilpuma grupām, konstatēts, ka lielāko daļu (no 67.6% ar Rottne H8 līdz 95.3% ar John Deere 1070 D) kokmateriālu sagatavo, zāgējot kokus, kuru stumbra tilpums nepārsniedz 0.15 m^3 . Līdzīga situācija novērota, izmantojot motorzāģi (Kalēja et al., 2015), kad 98.3% no sagatavotajiem kokmateriāliem iegūti, zāgējot kokus, kuru stumbra tilpums nepārsniedz 0.15 m^3 .

3.1. tabula. Koku dimensiju un sagatavotā kokmateriālu apjoma raksturojums /

Table 3.1. Characterization of dimensions and volume of extracted trees

Mežizstrādes mašīna / Harvester	Audzēs kods / Stand code	Koku skaits, gab./ Number of trees, pcs.	Vidējā nozāgētā koka caurmērs, cm / Average diameter of felled tree, cm	Vidējā nozāgētā koka augstums, m / Average height of felled tree, m	Sagatavotais kokmateriālu apjoms, m^3 / Volume of logs produced, m^3	Vidējā nozāgētā stumbra tilpums, m^3 / Volume of average processed tree, m^3
John Deere 1070 E	502-427-6	3 706	8.2 ± 0.09	11.6 ± 0.09	102	0.03 ± 0.001
	502-434-1	5 364	9.4 ± 0.07	12.9 ± 0.05	209	0.04 ± 0.001
	503-329-1	579	9.5 ± 0.19	12.7 ± 0.16	33	0.06 ± 0.003
	503-432-8	3 203	7.7 ± 0.07	11.3 ± 0.07	83	0.03 ± 0.001
	503-479-12	3 499	9.3 ± 0.07	12.8 ± 0.06	153	0.04 ± 0.001
	503-481-6	397	7.5 ± 0.19	11.1 ± 0.20	11	0.03 ± 0.002
Rottne H8	503-300-12	8 228	10.0 ± 0.05	11.4 ± 0.02	488	0.06 ± 0.001
	503-317-7	3 845	10.4 ± 0.07	11.5 ± 0.03	233	0.06 ± 0.001
	503-318-17	1 022	11.3 ± 0.14	11.9 ± 0.06	73	0.07 ± 0.002
	503-318-30	3 318	9.7 ± 0.08	11.2 ± 0.04	176	0.05 ± 0.001
	503-329-1	1 474	11.3 ± 0.13	11.9 ± 0.05	119	0.08 ± 0.002
John Deere 1070 D	502-427-6	13 454	4.3 ± 0.05	8.0 ± 0.05	86	0.01 ± 0.0004

3.2.2. Mežizstrādes mašīnu vidējie ražīguma rādītāji

Kopumā mašinizētas starpcirtes darba laika uzskaite veikta 456 motorstundas.

Analizējot vidējos ražīguma rādītājus atšķirīgām mežizstrādes mašīnām, jāsecina, ka starpcirtē, izmantojot John Deere 1070 E, efektīvajā darba stundā apstrādāti 158 koki, sagatavojot vidēji 5.6 m^3 kokmateriālu. Vidējais sasniegtais ražīgums ir 5.8 m^3 (vidēja nozāģētā stumbra tilpums 0.03 m^3) efektīvajā darba stundā (neskaitot laiku, kas patērēts iebraukšanai audzē un izbraukšanai no tās). Vidējais efektīvais darba laiks no kopējā darba laika (maiņas ilguma) ir 83.5%, iebraukšanai un izbraukšanai no audzes tērējot 4.6% no efektīvā darba laika.

Strādājot ar mašīnu Rottne H8, vidēji efektīvajā stundā apstrādāts 81 koks, sagatavojot vidēji 5.0 m^3 kokmateriālu. Vidējais sasniegtais ražīgums ir $5.3 \text{ m}^3 \text{ E}_{15} \text{ h}^{-1}$ (vidējā nozāģētā koka stumbra tilpums 0.06 m^3), neskaitot laiku, kas patērēts iebraukšanai audzē un izbraukšanai no tās. Vidējais efektīvais darba laiks no kopējā darba laika ir 83.7%, iebraukšanai un izbraukšanai no audzes tērējot 6.1% no efektīvā darba laika. Kā liecina rezultāti, efektīvā darba laika īpatsvars kopējā darba laikā raksturojams kā salīdzinoši liels, un ir lielāks par līdzīgos pētījumos (Sirén, 2003) mašinizētās starpcirtēs uzrādīto (81.6%).

Ar meža mašīnu John Deere 1070 D vidēji efektīvajā stundā apstrādāts 271 koks, sagatavojot vidēji 1.7 m^3 kokmateriālu. Vidējais sasniegtais ražīgums ir $1.8 \text{ m}^3 \text{ E}_{15} \text{ h}^{-1}$ (vidējā nozāģētā koka tilpums 0.01 m^3), neskaitot laiku, kas patērēts iebraukšanai audzē un izbraukšanai no tās. Vidējais efektīvais darba laiks no kopējā darba laika ir 75.2%, iebraukšanai un izbraukšanai no audzes patērēti 3.4% no efektīvā darba laika. Kaut arī efektīvajā darba stundā apstrādāto koku skaits ir salīdzinoši liels, ražīgumu būtiski ieteikmēja nozāģēto koku dimensijas, kas atbilst līdzīgos pētījumos izdarītajiem secinājumiem (Sirén, 2003). Tāpat operatori pilnībā nav sekojuši metodiskajiem norādījumiem, zāģējot kokus, kuru $D_{1,3} < 3 \text{ cm}$, arī tad, ja tie netraucē kokmateriālu novietošanai vai zāģēšanai (3.2. tabula).

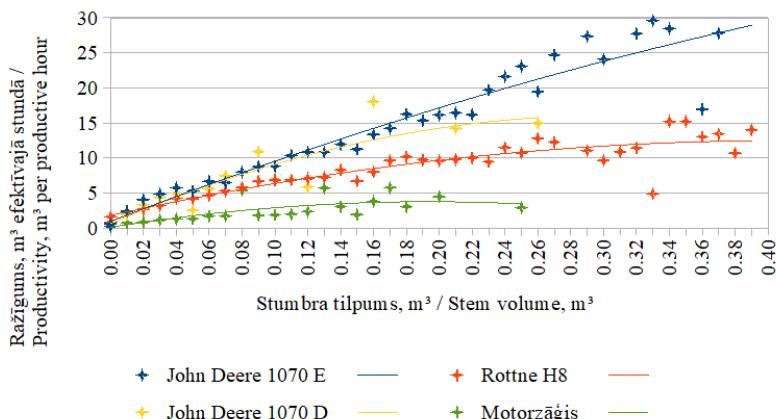
**3.2. tabula. Mežizstrādes mašīnām raksturīgu rādītāju kopsavilkums
sadalījumā pa mežaudzēm /**

Table 3.2. Summary of indicators by forest stand specific to forest machinery

Mežizstrādes mašīna / <i>Harvester</i>	Audzes kods / <i>Stand code</i>	Nostrādātās motorstundas / <i>Engine hours worked</i>	Vidējais ražīgums, koki $E_{15} \text{ h}^{-1}$ / <i>Average productivity, trees $E_{15} \text{ h}^{-1}$</i>	Efektīvais darba laiks no kopējā darba laika, % / <i>Productive work time of total work</i>	Iebraukšana un izbraukšana, % E_{15} / <i>Driving in and out, % E_{15}</i>	Vidējais ražīgums, $\text{m}^3 E_{15} \text{ h}^{-1}$ / <i>Average productivity, $m^3 E_{15} \text{ h}^{-1}$</i>	Vidējais ražīgums (neskaitot braukšanu), $\text{m}^3 E_{15} \text{ h}^{-1}$ / <i>Average productivity (excluding driving), $m^3 E_{15} \text{ h}^{-1}$</i>
John Deere 1070 E	502-427-6	22.3	174 ± 4	95.6	3.0	4.8 ± 0.1	4.9 ± 0.1
	502-434-1	41.8	164 ± 3	78.4	3.7	6.4 ± 0.1	6.6 ± 0.1
	503-329-1	6.1	117 ± 5	80.3	6.7	6.6 ± 0.3	7.1 ± 0.3
	503-432-8	25.1	155 ± 4	82.7	5.2	4.0 ± 0.1	4.2 ± 0.1
	503-479-12	28.6	146 ± 3	83.6	5.9	6.4 ± 0.2	6.8 ± 0.2
	503-481-6	3.2	151 ± 5	81.4	8.8	4.3 ± 0.2	4.7 ± 0.2
Rottne H8	503-300-12	120.4	75 ± 3	91.3	7.4	4.4 ± 0.2	4.8 ± 0.2
	503-317-7	54.7	94 ± 2	75.1	6.0	5.7 ± 0.1	6.0 ± 0.1
	503-318-17	12.6	96 ± 2	84.5	2.5	6.9 ± 0.2	7.1 ± 0.2
	503-318-30	54.8	82 ± 3	74.2	3.6	4.3 ± 0.3	4.5 ± 0.2
	503-329-1	20.1	84 ± 2	86.7	6.0	6.8 ± 0.2	7.2 ± 0.1
John Deere 1070 D	502-427-6	66.1	271 ± 4	75.2	3.4	1.7 ± 0.1	1.8 ± 0.1

Salīdzinot vidējos ražīguma rādītājus atšķirīgām starpcirtē izmantotām mežizstrādes mašīnām, atkarībā no nozāģētā stumbra tilpuma (3.3. att.) konstatēts, ka vislabākie rezultāti sasniegti, darbus veicot ar John Deere 1070 E, kas aprīkots ar H 754 darba galvu, kam seko John Deere 1070 D ar Bracke C16.b darba galvu un Rottne H8, kas aprīkota ar EGS 405 darba galvu. Būtiskas

atšķirības ($p < 0.05$) konstatētas, salīdzinot ražīguma rādītājus mežizstrādes mašīnām John Deere 1070 E un Rottne H8. Kaut arī promocijas darba ietvaros veiktajos izmēģinājumos kopšanas darbi, izmantojot motorzāgi, netika veikti, ražīguma rādītāju salīdzināšanai izmantoti dati, kas iegūti līdzīgos pētījumos (Kalēja et al., 2015). Kopumā ražīguma rādītāji, izmantojot motorzāgi, ir būtiski mazāki ($p < 0.05$ salīdzinājumā ar John Deere 1070 E; $p < 0.05$ salīdzinājumā ar John Deere 1070 D; $p < 0.05$ salīdzinājumā ar Rottne H8) nekā mašinizeitās starpcirtēs ražīguma rādītāji. Palielinoties nozāgētā stumbra tilpumam, palielinās ražīgums, tomēr, sasniedzot noteiktas koku dimensijas (John Deere 1070 E – 0.33 m^3 ; Rottne H8 – 0.32 m^3 ; John Deere 1070 D – 0.16 m^3), ražīguma rādītāji vairs nepalielinās.



3.3. att. Vidējo ražīguma rādītāju salīdzinājums attiecīgā stumbra tilpuma grupā starpcirtē izmantotajām mežizstrādes mašīnām un rokas motorzāgim /

Fig. 3.3. Comparison of average productivity of harvester and chainsaw in thinning by stem volume group

Ar regresijas funkciju var izskaidrot 91.5% (John Deere 1070 E), 81.9% (Rottne H8) un 80.4% (John Deere 1070 D) no izmantoto mašīnu ražīguma rādītāju izmaiņām. Izmantojot motorzāgi, 50.3% no ražīguma rādītāju izmaiņām skaidrojamas ar regresijas funkciju. Veicot regresijas vienādojuma būtiskuma novērtējumu, F-testa p-vērtība visos gadījumos ir mazāka par 0.05, kas nozīmē, ka regresijas vienādojumi statistiski nozīmīgi izskaidro vidējo ražīguma rādītāju izmaiņas, atkarībā no zāgējamo koku caurmēra vai tilpuma. Starpcirtē izmantoto mašīnu un motorinstrumentu ražīguma rādītāju regresijas vienādojumu koeficienti doti 3.3. tabulā.

3.3. tabula. Starpcirtē izmantotajām mežizstrādes mašīnām un motorzāgim raksturīgo vidējo ražīguma rādītāju regresijas analīzes rezultāti /
Table 3.3. Results of regression analysis of average productivity of harvesters and chainsaws in thinning

Koeficients / Coefficient	Koeficienta vērtība / Value of coefficient	Standartklūda / Standard error	t-testa faktiskā vērtība / Actual value of the t- test	p-vērtība / p-value
John Deere 1070 E				
a	0.895868	1.071575	0.836028709	0.409338255
b	91.19156	14.47364	6.300525578	4.56023E ⁻⁰⁷
c	-49.6721	40.70066	-1.220424181	0.231221528
Rottne H8				
a	1.712063049	0.682744814	2.507617799	0.017094225
b	53.8443728	9.040072109	5.956188419	9.8169E ⁻⁰⁷
c	-69.75723927	24.73321021	-2.820387595	0.007947637
John Deere 1070 D				
a	0.637783567	1.46680713	0.43481079	0.67210702
b	100.7931133	31.43759951	3.206132621	0.008362893
c	-163.9584908	121.6288765	-1.348022736	0.204755484
Motorzāgis / Chainsaw				
a	0.095346751	0.675377142	0.141175567	0.889299216
b	37.64778433	13.14094294	2.864922593	0.010295621
c	-97.0220595	55.29421225	-1.754651266	0.096325984

Analizējot darba laika elementu īpatsvaru efektīvajā darba laikā, sagatavojot 1 m³ kokmateriālu, konstatēts, ka nozāgēto koku atzarošana/garumošana un sniegšanās pēc zāgējamā koka aizņēmusi salīdzinoši visvairāk laika, attiecīgi no 20.6% ar John Deere 1070 E līdz 31.6% ar Rottne H8 un no 12.8% ar Rottne H8 līdz 33.6% ar John Deere 1070 E. Vismazāk efektīvā laika tērēts tādu darba elementu izpildei kā zaru novietošana (no 0.1% ar John Deere 1070 E līdz 1.6% ar Rottne H8), kas skaidrojams ar labiem darba apstākļiem, un zāgēšanai (no 3% ar Rottne H8 līdz 8.1% ar John Deere 1070 E). Iebraukšanai audzē, pārbraucieniem pa audzi un izbraukšanai no audzes tērētais laiks aprēķināts kā vidējā vērtība katrai no starpcirtē izmantotajām mežizstrādes mašīnām. Šos rādītāju lielā mērā ietekmē cīrsmas platība. Efektīvais darba laiks, kas tērēts iebraukšanai un izbraukšanai no audzes, bijis no 1.3% ar John Deere 1070 E līdz 2.2% ar Rottne H8 un no 2.1% ar John Deere 1070 E līdz 3.9% ar Rottne H8.

3.2.3. Darba metodes ietekme uz ražīguma rādītājiem

Starpcirtē salīdzinātas divas darba metodes. Pirmā darba metode paredz gatavot darba uzdevumā noteiktos sortimentus, enerģētiskās koksnes

gatavošanai izmantojot koku galotnes un stumbrus, kuri nav piemēroti citu, kvalitātes prasībām atbilstošu, kokmateriālu sortimentu gatavošanai. Tāpat darba metode paredz enerģētiskās koksnes gatavošanā maksimāli izmantot stumbru uzkrāšanas funkciju. Otrā darba metode paredz no visiem nozāģētajiem kokiem gatavot enerģētisko koksni (daļēji atzarotu sīkkoksnī), maksimāli izmantojot stumbru uzkrāšanas funkciju.

Strādājot ar pirmo darba metodi (mežizstrādes mašīnas John Deere 1070 E un Rottne H8), sagatavoti 1 176 m³ koksnes (17 724 darba cikli), bet ar otro (mežizstrādes mašīnas John Deere 1070 E un John Deere 1070 D) – 119 m³ koksnes (3138 darba cikli). Lielāki vidējie ražīguma rādītāji sasniegti, starpcirtē izmantojot otro darba metodi, nekā strādājot ar pirmo darba metodi. Mežizstrādes mašīnām raksturīgu rādītāju salīdzinājums starp izmantotajām darba metodēm atspoguļots 3.4. tabulā.

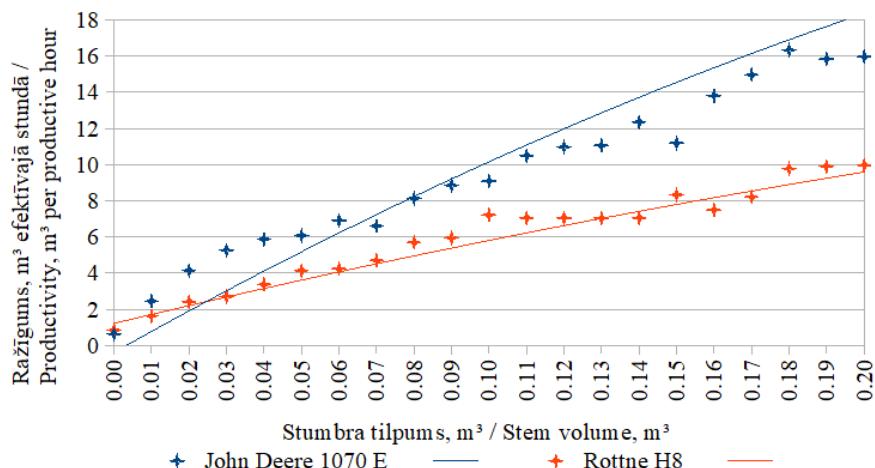
3.4. tabula. Mežizstrādes mašīnām raksturīgu rādītāju salīdzinājums izmantoto darba metožu griezumā /

Table 3.4. Comparison of harvester productivity and stand parameters by working method applied

Mežizstrādes mašīna / Harvester		Darba metode / Working method	Novērojumu skaits / Number of observations	Efektīvais darba laiks no kopējā darba laika, % / Productive work time of total work time, %	Sagatavotais kokmateriālu apjoms, m³ / Amount of logs produced, m³	Vidējais ražīgums, m³ E₁₅ h⁻¹ / Average productivity, m³ E₁₅ h⁻¹	Vidējā nozāģētā stumbra tilpums, m³ / Volume of average felled tree, m³	Vidējā nozāģētā koka caurmērs, cm / Diameter of average felled tree, cm	Koku skaits, gab. / Number of trees, pcs.	Vidējais nozāģēto stumbru skaits darba ciklā, gab. / Average number of processed trees per work cycle, pcs.
John Deere 1070 E	1.	6247	85.7	396.6	5.4 ± 0.2	0.05 ± 0.1	8.6 ± 0.3	12167	2.0 ± 0.1	
	2.	500	61.0	33.4	4.0 ± 0.3	0.05 ± 0.1	8.3 ± 0.2	837	1.5 ± 0.1	
Rottne H8	1.	11477	82.1	779.5	5.0 ± 0.2	0.07 ± 0.1	10.2 ± 0.5	13081	1.2 ± 0.1	
John Deere 1070 D	2.	2638	75.2	86.0	1.7 ± 0.1	0.01 ± 0.1	4.0 ± 0.3	13454	5.2 ± 0.3	

Salīdzinot vidējos ražīguma rādītājus attiecīgā stumbra tilpuma grupā, starpcirtē strādājot ar 1. darba metodi, labāki rādītāji iegūti, izmantojot

mežizstrādes mašīnu John Deere 1070 E. Atšķirības ir statistiski būtiskas ($p = < 0.05$). Būtiski lielāki vidējie ražīguma rādītāji sasniegoti, gan apstrādājot mazu dimensiju kokus (koka tilpums grupā $> 0.01 \text{ m}^3$ uzrādītais ražīguma rādītājs Rottne H8, salīdzinājumā ar John Deere 1070 E, ir par 33% mazāks), gan lielākus (koka tilpums grupā $0.06\text{--}0.07 \text{ m}^3$ uzrādītais ražīguma rādītājs Rottne H8, salīdzinājumā ar John Deere 1070 E, ir par 29% mazāks). Stumbra tilpumam sasniedzot 0.45 m^3 , mežizstrādes mašīnai John Deere 1070 E ražīguma rādītāji pārstāj pieaugt (3.4. att.).



3.4. att. Vidējo ražīguma rādītāju salīdzinājums mežizstrādes mašīnām attiecīgā stumbra tilpuma grupā pirmajai darba metodei /
Fig. 3.4. Comparison of average harvester productivity indicators by the stem volume group for the first working method

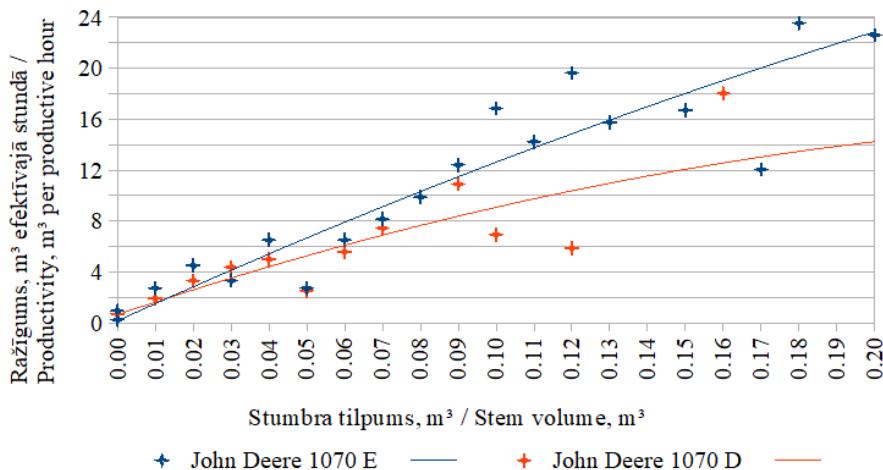
Ar regresijas funkciju var izskaidrot 90.3% (John Deere 1070 E) un 62.6% (Rottne H8) no starpcirtē izmantoto mašīnu ražīguma rādītāju izmaiņām. Regresijas vienādojuma būtiskuma novērtējums parāda, ka F-testa p-vērtība visos gadījumos ir mazāka par 0.05, kas nozīmē, ka regresijas vienādojumi statistiski nozīmīgi izskaidro vidējo ražīguma rādītāju izmaiņas. Pirmajai darba metodei raksturīgie vidējo ražīguma rādītāju regresijas analīzes rezultāti katrai no starpcirtē izmantotajām mežizstrādes mašīnām doti 3.5.tabulā.

3.5. tabula. Pirmajai darba metodei raksturīgo vidējo ražīguma rādītāju regresijas analīzes rezultāti /

Table 3.5. Results of regression analysis of average productivity indicators characteristic for the first working method

Koeficients / Coefficient	Koeficienta vērtība / Value of coefficient	Standartklūda / Standard error	t-testa faktiskā vērtība / Actual value of the t- test	p-vērtība / p-value
John Deere 1070 E				
a	-0.392485877	1.071786405	-0.36619785	0.716360811
b	117.1869614	7.931463586	14.77494792	7.40103E ⁻¹⁷
c	-117.2486243	11.87811014	-9.870983088	8.77875E ⁻¹²
Rottne H8				
a	1.215406733	1.261608711	0.96337852	0.339499356
b	49.87584282	8.167626856	6.106528089	1.01938E ⁻⁰⁷
c	-40.14429025	11.2784911	-3.559367108	0.000766239

Salīdzinot vidējos ražīguma rādītājus attiecīgā stumbra tilpuma grupā, starpcirtē izmantojot 2. darba metodi, redzams, ka labāki rādītāji iegūti, izmantojot mežizstrādes mašīnu John Deere 1070 E, turklāt atšķirības ir statistiski būtiskas ($p < 0.05$, 3.5. att.). Mežizstrādes mašīna John Deere 1070 E uzrāda būtiski lielākus vidējos ražīguma rādītājus, gan apstrādājot mazu dimensiju kokus (ja stumbra tilpums $< 0.01 \text{ m}^3$, ražīguma rādītājs John Deere 1070 D, salīdzinājumā ar John Deere 1070 E, ir par 29% mazāks), gan lielākus (ja stumbra tilpums ir vidēji 0.26 m^3 , ražīguma rādītājs John Deere 1070 D salīdzinājumā ar John Deere 1070 E ir par 47% mazāks). Salīdzinoši mazs vidējā nozāgētā koka tilpums (vien 0.01 m^3) ir viens no būtiskākajiem faktoriem, kas ietekmējis John Deere 1070 D ražīguma rādītājus, neskatoties uz to, ka operatori aktīvi izmantojuši stumburu uzkrāšanas mehānismu (vidēji 5.2 darba ciklā apstrādāti koki), vidējais ražīgums ir relatīvi neliels. Stumbra tilpumam sasniedzot 0.6 m^3 , ražīguma rādītāji nepalielinās arī, strādājot ar John Deere 1070 E.



3.5. att. Vidējo ražīguma rādītāju salīdzinājums attiecīgā stumbra tilpuma grupā otrajai darba metodei /

Fig. 3.5. Comparison of average harvester productivity by the stem volume groups for the second working method

Ar regresijas vienādojumu var izskaidrot 96.1% (John Deere 1070 E) un 80.4% (John Deere 1070 D) no ražīguma rādītāju izmaiņām, starpcirtē izmantojot 2. darba metodi. Regresijas vienādojuma būtiskuma novērtējums parāda, ka F-testa p-vērtība visos gadījumos ir mazāka par 0.05, kas nozīmē, ka regresijas vienādojumi statistiski nozīmīgi izskaidro vidējo ražīguma rādītāju izmaiņas. Otrajai metodei raksturīgie vidējo ražīguma rādītāju regresijas analīzes rezultāti, katrai no starpcirtē izmantotajām mežizstrādes mašīnām doti 3.6. tabulā.

3.6. tabula. Otrajai darba metodei raksturīgo vidējo ražīguma rādītāju regresijas analīzes rezultāti /

Table 3.6. Results of regression analysis of average productivity indicators of the second working method

Koeficients / Coefficient	Koeficienta vērtība / Value of coefficient	Standartklūda / Standard error	t-testa faktiskā vērtība / Actual value of the t-test	p-vērtība / p-value
John Deere 1070 E				
a	1.253042767	1.084604249	1.155299518	0.260361827
b	113.2956835	12.03230992	9.415954568	3.56682E-09
c	-49.89734084	22.9636665	-2.172882142	0.040836327

3.6. tabulas turpinājums / continuation of the Table 3.6.

Koeficients / Coefficient	Koeficienta vērtība / Value of coefficient	Standartklūda / Standard error	t-testa faktiskā vērtība / Actual value of the t-test	p-vērtība / p-value
John Deere 1070 D				
a	0.637783567	1.46680713	0.43481079	0.67210702
b	100.7931133	31.43759951	3.206132621	0.008362893
c	-163.9584908	121.6288765	-1.348022736	0.204755484

3.2.4. Operatora ietekme uz ražīguma rādītājiem

Līdzīgos pētījumos secināts, ka operatoru darba ieradumiem ir būtiska ietekme uz meža mašīnu ražīguma rādītājiem (Kärhä et al., 2004), tādēļ, analizējot darba metodes ietekmi, nemts vēra arī operatoru sniegums, izmantojot dažadas darba metodes.

Strādājot ar mežizstrādes mašīnu John Deere 1070 E, izmantojot 1. darba metodi, kas paredz gatavot standarta sortimentus un daļēji atzarotos sīkkoksnes sortimentus, maksimāli izmantojot stumburu uzkrāšanas mehānismu, veica divi operatori (turpmāk tekstā A un B). Savukārt ar mežizstrādes mašīnu Rottne H8 strādāja četri operatori (turpmāk tekstā C, D, E un F).

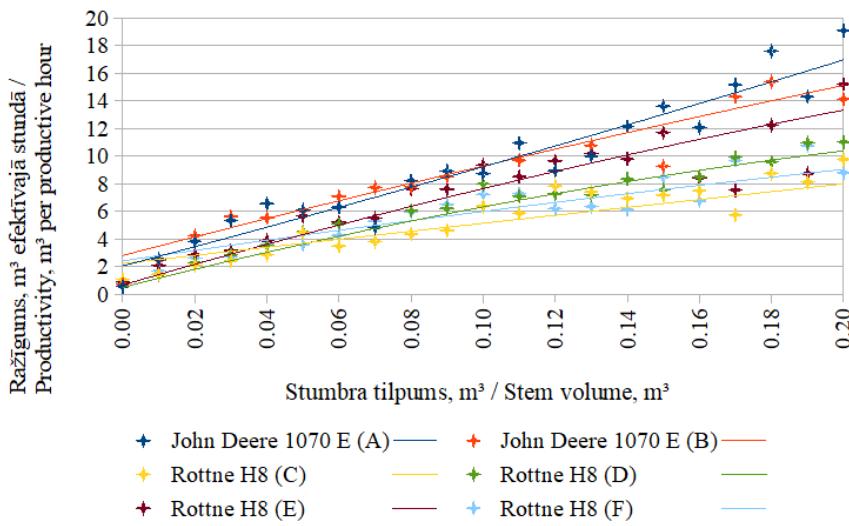
Labākos vidējos ražīguma rādītājus (5.4 m^3 efektīvajā stundā pie vidējā stumbra tilpuma 0.05 m^3) uzrādīja mežizstrādes mašīna John Deere 1070 E. Abu operatoru uzrādītie vidējie ražīguma rādītāji ir līdzīgi, tomēr, analizējot vidējo ražīguma rādītāju izmaiņas dažādās stumbra tilpuma grupās (3.6. att.), apstrādājot kokus, kuru tilpums ir lielāks par 0.1 m^3 , vērojamas statistiski būtiskas ($p = < 0.05$) atšķirības, un operatora A uzrādītie vidējie ražīguma rādītāji ir ievērojami labāki. Arī mežistrādes mašīnas Rottne H8 operatoru uzrādītie vidējie ražīguma rādītāji dažādās stumbra tilpuma grupās statistiski būtiski ($p = < 0.05$) atšķirās un vidējais ražīgums atkarībā no operatora bija no 4.2 m^3 (vidējā nozāģētā stumbra tilpums 0.06 m^3) operatoram C līdz 6.8 m^3 (vidējā nozāģētā stumbra tilpums 0.08 m^3) operatoram E (3.7. tabula).

3.7. tabula. Mežizstrādes mašīnu operatoriem raksturīgo rādītāju salīdzinājums, starpcirtē izmantojot pirmo darba metodi /

Table 3.7. Comparison of indicators characteristic of harvester operators using the first working method in thinning

Mežizstrādes mašīna / Harvester		Operators / Operator		Efektīvais darba laiks no kopējā darba laika, % / Productive work time of total work time, %		Sagatavotais kokmateriālu apjoms, m ³ / Amount of timber prepared, m ³		Vidējais ražīgums, m ³ E ₁₅ h ⁻¹ / Average productivity, m ³ E ₁₅ h ⁻¹		Vidējā nozāģētā stumbra tilpums, m ³ / Volume of average extracted tree,		Vidējā nozāģētā koka caurmērs, cm / Average diameter of felled tree, cm		Koku skaits, gab. / Number of trees, pcs.	
John Deere 1070 E	A	2578	86.7	169	5.4 ± 0.1	0.05 ± 0.1	8.7 ± 0.1	5 143	2.0 ± 0.1	Vidējais nozāģēto stumbriku skaits darba ciklā, gab. / Average number of felled stems per work cycle, pcs.	Vidējais nozāģēto stumbriku skaits darba ciklā, gab. / Average number of felled stems per work cycle, pcs.				
	B	3669	84.6	227	5.4 ± 0.1	0.05 ± 0.1	8.5 ± 0.1	7 024	1.9 ± 0.1						
Rottne H8	C	3256	80.7	197	4.2 ± 0.1	0.06 ± 0.1	9.7 ± 0.1	3 614	1.2 ± 0.1	Vidējais nozāģēto stumbriku skaits darba ciklā, gab. / Average number of felled stems per work cycle, pcs.	Vidējais nozāģēto stumbriku skaits darba ciklā, gab. / Average number of felled stems per work cycle, pcs.				
	D	1355	87.9	103	5.2 ± 0.1	0.07 ± 0.1	10.6 ± 0.1	1 612	1.2 ± 0.1						
	E	1493	83.0	124	6.8 ± 0.1	0.08 ± 0.1	11.0 ± 0.1	1 726	1.2 ± 0.1						
	F	5373	81.4	356	5.0 ± 0.1	0.07 ± 0.1	10.1 ± 0.1	6 129	1.2 ± 0.1						

Atšķirības uzrādītajos ražīguma rādītājos skaidrojamas ar atšķirīgu pieejumu zāģējamo koku izvēlei, kas ietekmē nogāšanas un atzarošanas laiku, kā arī darba laika izmantošanas efektivitāti. Operatoram, kurš uzrādījis sliktākos ražīguma rādītājus, novērots arī mazākais efektīvā darba laika īpatsvars no kopējā darba laikā (80.7%). Izmantojot vienādojumu ražīguma rādītāju aprēķināšanai pie atšķirīga zāģējamo koku tilpuma (no 0.01 līdz 0.10 m³), operatoru ražīguma rādītāji pieaug no 1.3 līdz 6.2 m³ E₁₅ h⁻¹ operatoram C; no 1.1 līdz 6.9 m³ E₁₅ h⁻¹ operatoram D; no 1.4 līdz 9.0 m³ E₁₅ h⁻¹ operatoram E un no 1.5 līdz 7.3 m³ E₁₅ h⁻¹ operatoram F (3.6. att.).



3.6. att. Mežizstrādes mašīnu operatoru vidējo ražīguma rādītāju salīdzinājums, strādājot ar pirmo darba metodei /

Fig. 3.6. Comparison of average productivity indicators of harvester operators using the first working method

Ar regresijas vienādojumu var izskaidrot 94.6% John Deere 1070 E, operators A; 86.1% John Deere 1070 E, operators B; 79.3% Rottne H8, operators C; 46.9% Rottne H8, operators D; 65.7% Rottne H8, operators E; un 65.7% Rottne H8, operators F, ražīguma rādītāju izmaiņas, mašinizētā starpcirtē izmantojot 1. darba metodi. Regresijas vienādojuma būtiskuma novērtējums parāda, ka F-testa p-vērtība visos gadījumos ir mazāka par 0.05, kas nozīmē, ka regresijas vienādojumi statistiski nozīmīgi izskaidro vidējo ražīguma rādītāju izmaiņas. Operatoriem raksturīgie vidējo ražīguma rādītāju regresijas analīzes rezultāti pievienoti 3.8.tabulā.

3.8. tabula. Pirmajai darba metodei raksturīgo vidējo ražīguma rādītāju regresijas analīzes rezultāti sadalījumā pa operatoriem /

Table 3.8. Results of regression analysis of average productivity indicators characteristic for the first working method in division by operators

Koeficients / Coefficient	Koeficienta vērtība / Value of coefficient	Standartklūda / Standard error	t-testa faktiskā vērtība / Actual value of the t-test	p-vērtība / p-value
John Deere 1070 E (A)				
a	2.042517457	1.275798071	1.600972367	0.118914112
b	69.09181806	10.68001269	6.469263669	2.44067E ⁻⁰⁷
c	28.10805641	17.60256374	1.596816056	0.119839834
John Deere 1070 E (B)				
a	2.800532314	1.505424111	1.86029458	0.074647829
b	68.07231263	11.54399308	5.896773512	3.74428E ⁻⁰⁶
c	-32.10077992	16.5174589	-1.943445425	0.063301939
Rottne H8 (C)				
a	2.224266406	0.799775124	2.781114763	0.008383649
b	29.36166259	8.385868773	3.501326265	0.00120053
c	-2.55393094	18.72031472	-0.136425641	0.892205023
Rottne H8 (D)				
a	0.488907745	1.665267292	0.293591153	0.770804278
b	67.13056831	14.63665764	4.586468437	5.55678E ⁻⁰⁵
c	-88.34044146	26.81592348	-3.294327772	0.002264308
Rottne H8 (E)				
a	0.657544265	1.790313837	0.36727877	0.715132759
b	76.440444839	12.69852825	6.019630532	2.91973E ⁻⁰⁷
c	-65.08940487	18.68802088	-3.482947996	0.001116028
Rottne H8 (F)				
a	0.657544265	1.790313837	0.36727877	0.715132759
b	76.440444839	12.69852825	6.019630532	2.91973E ⁻⁰⁷
c	-65.08940487	18.68802088	-3.482947996	0.001116028

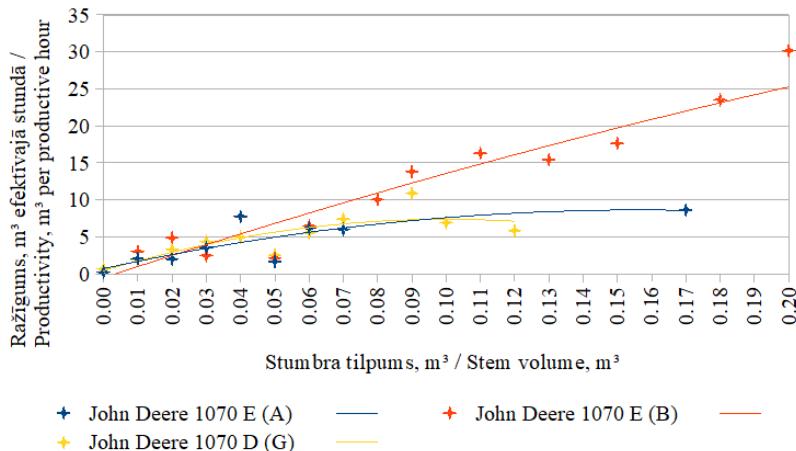
Mašinizētā starpcirtē, izmantojot 2. darba metodi, kas paredz gatavot tikai enerģētisko koksnī, darbus veica divi mežizstrādes mašīnas John Deere 1070 E operatori (A un B) un viens John Deere 1070 D operators (G). Labākos vidējos ražīguma rādītājus ($4.5 \text{ m}^3 \text{ E}_{15} \text{ h}^{-1}$ pie vidējā stumbra tilpuma 0.05 m^3) uzrādīja John Deere 1070 E operators B (3.9. tabula).

3.9. tabula. Mežizstrādes mašīnu operatoriem raksturīgo rādītāju salīdzinājums, starpcirtē izmantojot otro darba metodi /

Table 3.9. Comparison of indicators characteristic of harvester operators using the second working method in thinning

Mežizstrādes mašīna / <i>Forrest machine</i>		Operators / operator		Novērojumu skaits / <i>Number of observations</i>		Efektīvais darba laiks no kopējā darba laikā, % / <i>Productive work time of total work time, %</i>		Sagatavotas kokmateriālu apjoms, m³ / <i>Amount of timber prepared, m³</i>		Vidējais ražīgums, m³ E₁₅ h⁻¹ / <i>Average productivity, m³ E₁₅ h⁻¹</i>		Vidēja nozāģēta stumbra tilpums, m³ / <i>Volume of average felled tree, m³</i>		Vidējā nozāģētā koka caurmērs, cm / <i>Average diameter of felled tree, cm</i>		Koku skaits, gab. / <i>Number of trees, pcs.</i>		Vidējais nozāģēto stumbru skaits darba cikā, gab. / <i>Average number of trees processed/felled per work cycle, pcs.</i>		
John Deere 1070 E	A	20	53.4	1	3.5 ± 0.1	0.04 ± 0.1	7.4 ± 0.1	28	1.4 ± 0.1											
John Deere 1070 E	B	480	68.7	33	4.5 ± 0.1	0.05 ± 0.1	9.3 ± 0.1	809	1.7 ± 0.1											
John Deere 1070 D	G	2638	75.2	86	1.7 ± 0.1	0.01 ± 0.1	4.0 ± 0.1	13454	5.2 ± 0.1											

Kaut arī vidējie ražīguma rādītāji operatoriem ir atšķirīgi, salīdzinot ražīguma rādītājus, kādi sasniegti, apstrādājot dažāda tilpuma stumbrus (3.7. att.), statistiski būtiskas atšķirības starp operatoriem nav konstatētas ($p > 0.05$). Izmantojot vienādojumu ražīguma rādītāju aprēķināšanai pie dažādiem stumbra tilpumiem (no 0.01 līdz 0.10 m³), operatoru uzrādītie ražīguma rādītāji pieaug no 1.7 līdz 7.8 m³ E₁₅ h⁻¹ John Deere 1070 E, operators A; no 2.1 līdz 13.8 m³ E₁₅ h⁻¹ John Deere 1070 E, operators B; no 1.9 līdz 10.9 m³ E₁₅ h⁻¹ John Deere 1070 D, operators G.



3.7. att. **Mežizstrādes mašīnu operatoru vidējo ražīguma rādītāju salīdzinājums, strādājot ar otro darba metodei /**

Fig. 3.7. Comparison of average productivity values of harvester operators working with the second working method

Ar regresijas vienādojumu var izskaidrot 65.9% John Deere 1070 E, operators A; 96.4% John Deere 1070 E, operators B; un 80.4% John Deere 1070 D, operators G, no ražīguma rādītāju izmaiņām, starpcirtē izmantojot 2. darba metodi. Regresijas vienādojuma būtiskuma novērtējums parāda, ka F-testa p-vērtība visos gadījumos ir mazāka par 0.05, kas nozīmē, ka regresijas vienādojumi statistiski nozīmīgi izskaidro vidējo ražīguma rādītāju izmaiņas. Operatoriem raksturīgie vidējo ražīguma rādītāju regresijas analīzes rezultāti pievienoti 3.10. tabulā.

3.10. tabula. **Otrajai darba metodei raksturīgo vidējo ražīguma rādītāju regresijas analīzes rezultāti sadalījumā pa operatoriem /**

Table 3.10. Results of regression analysis of average productivity indicators characteristic for the second working method by harvester operators

Koeficients / Coefficient	Koeficienta vērtība / Value of coefficient	Standartklūda / Standard error	t-testa faktiskā vērtība / Actual value of the t-test	p-vērtība / p-value
John Deere 1070 E (A)				
a	0.739434	1.422371	0.51986	0.621776
b	100.7864	47.88097	2.104936	0.07993
c	-320.846	262.7422	-1.22115	0.267834

Tabulas 3.10. turpinājums/ continuation of the Table 3.10.

Koeficients / Coefficient	Koeficienta vērtība / Value of coefficient	Standartklūda / Standard error	t-testa faktiskā vērtība / Actual value of the t-test	p-vērtība / p-value
John Deere 1070 E (B)				
a	-0.503	1.568134	-0.32138	0.752086
b	152.7976	17.95734	8.508921	2.47E-07
c	-119.708	36.40862	-3.28791	0.004636
John Deere 1070 D (G)				
a	0.637784	1.466807	0.434811	0.672107
b	100.7931	31.4376	3.206133	0.0083663
c	-163.958	121.6289	-1.34802	0.204755

Strādājot ar 1. darba metodi, mežizstrādes mašīnas John Deere 1070 E sasniegtie ražīguma rādītāji atkarībā no nozāģēto stumbru tilpuma izmēģinājumos iesaistītajiem operatoriem atšķiras par 1.2% (stumbra tilpums 0.05 m³) līdz 38% (stumbra tilpums 0.07 m³).

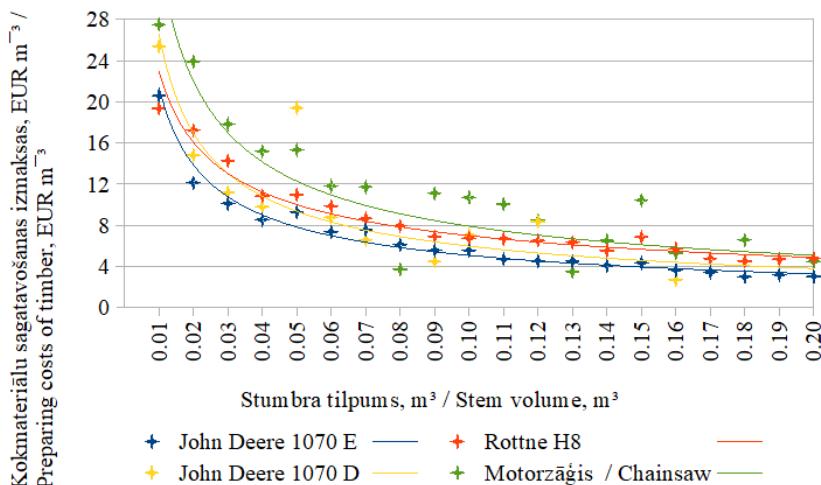
Izmantojot 2. darba metodi, mežizstrādes mašīnas John Deere 1070 E operatoru sasniegtie ražīguma rādītāji atkarībā no nozāģēto stumbru tilpuma atšķiras no 0.4% (stumbra tilpums 0.04 m³) līdz 59% (stumbra tilpums 0.02 m³).

3.3. Mašinizētas starpcirtes ekonomiskā efektivitāte

Viens no galvenajiem faktoriem, kas ietekmē mežizstrādes mašīnas izvēli mašinizētā starpcirtē meža platībās ar 9–12 m augstiem kokiem, ir darbu izmaksas. Pakalpojumu pircējiem, tāpat kā pakalpojumu sniedzējiem, aizvien aktuāls ir jautājums par mežizstrādes mašīnu ražīguma un ekonomiskā izdevīguma palielināšanu. Līdzšinējie pētījumi pierādījuši, ka tehnoloģiju izmantošana ļauj vismaz par 16% palielināt ražīgumu (Bergström, 2009; Bergström et al., 2010; Lazdiņš, 2012), tādējādi uzlabojot mašinizētas starpcirtes un energētiskās koksnes sagatavošanas ekonomisko izdevīgumu.

Tā kā starpcirtēs galvenokārt iegūst energētiskās koksnes sagatavošanai piemērotu sīkkoksnī (apstrādājamo stumbru tilpums ir no 0.01 līdz 0.10 m³), būtiski ir meklēt līdzsvaru starp kokmateriālu sagatavošanas izmaksām un tirgus cenu, par kādu sagatavotos kokmateriālus iespējams realizēt. Veicot mašinizētas kokmateriālu sagatavošanas izmaksu analīzi, izmantoti izmēģinājumos iegūtie vidējie ražīguma rādītāji un aprēķinātās efektīvās darba stundas izmaksas katrai no izmantotajām mežizstrādes mašīnām. Abām vidējās klases meža mašīnām vidējās efektīvas darba stundas izmaksas saskaņā ar aprēķiniem ir 49 EUR, savukārt mazās klases meža mašīnas efektīvas darba stundas izmaksas ir 46 EUR, t.i. par 6% mazākas. Darba stundas izmaksas būtiski ietekmē pieņēmumi par operatoru atalgojumu un mašīnu tehnisko gatavību un izmantošanas efektivitāti, kas var dubultot aprēķinātās darba stundas izmaksas. Iegūtie rezultāti parāda, ka, izmantojot vidējas klases mežizstrādes mašīnu

John Deere 1070 E, kokmateriālu sagatavošanas izmaksas ir mazākas nekā abām pārējām izmantotajām mežizstrādes mašīnām (3.8. att.).



3.8. att. Kokmateriālu sagatavošanas izmaksas dažādām mežizstrādes mašīnām atkarībā no nozāgētā stumbra tilpuma /

Fig. 3.8. Timber production costs by different harvesters depending on the volume of the extracted trees

Dažādu valstu pētnieki veikuši darba ražīguma pētījumus, lai izstrādātu pēc iespējas precīzākus kokmateriālu ražošanas izmaksu aprēķina modeļus, kas ļauj prognozēt sagaidāmās un aktuālās ražošanas izmaksas. Enerģētiskās koksnes ražošanas izmaksu aprēķināšanai izmantots papildināts un pielāgots COST projekta FP0902 aktivitātēs ietvaros izstrādāts izmaksu kalkulācijas bāzes modelis, kas paredz izmaksu kalkulāciju gan atsevišķām mežizstrādes tehnoloģiskā procesa daļām, gan mežizstrādes tehnoloģiskajam procesam kopumā (Kalēja et al., 2018b).

Kokmateriālu sagatavošanā salīdzinātas izmaksas trīs izmantotajām mežizstrādes mašīnām ar katrai mašīnai raksturīgām izmaksām un ražīguma rādītājiem. Kokmateriālu sagatavošanas izmaksas sastāv no 3 izmaksu pozīciju grupām un plānotās peļņas. Darbas pēka izmaksas veido lielāko daļu no mežizstrādes mašīnu gada kopējām izmaksām un ir no 37% (John Deere 1070 E) līdz 41% (Rottne H8). Ieguldījumu izmaksas ir otrs lielākais izmaksu postenis un atkarībā no izmantotās meža mašīnas ir no 29% (Rottne H8) līdz 34% (John Deere 1070 D). Kopējās ekspluatācijas izmaksas ir no 21% (Rottne H8) līdz 25% (John Deere 1070 E un John Deere 1070 D).

Mašīnizētas mežizstrādes darbos, izmantojot vidējas klases mežizstrādes mašīnas John Deere 1070 E un John Deere 1070 D, pie sasniegtajiem katrai

mašīnai raksturīgajiem vidējiem ražīguma rādītājiem, gada laikā (2880 efektīvās darba stundas) iespējams sagatavot 14 tūkst. m³ apaļo kokmateriālu un 6 tūkst. ber. m³ enerģētiskās koksnes, strādājot ar John Deere 1070 E un 5 tūkst. m³ apaļo kokmateriālu un 1 tūkst. ber. m³ enerģētiskās koksnes, strādājot ar John Deere 1070 D. Mazās klases mežizstrādes mašīna Rottne H8 gada laikā (vidējais sasniegtais ražīgums 5 m³ E₁₅ h⁻¹; 2880 efektīvās darba stundas) sagatavo 15 tūkst. m³ apaļo kokmateriālu un 6 tūkst. ber. m³ enerģētiskās koksnes. Vidējās kokmateriālu sagatavošanas izmaksas būtiski ietekmē mašīnu ražīgums (3.11. tabula). Mazākās kokmateriālu sagatavošanas izmaksas sasniegtas, izmantojot John Deere 1070 E mežizstrādes mašīnu (vidējais ražīgums 5.6 m³ E₁₅ h⁻¹). Izmantojot mazās klases mežizstrādes mašīnu Rottne H8, vidējās kokmateriālu sagatavošanas izmaksas ir par 11% (vidējais ražīgums 5 m³ E₁₅ h⁻¹) lielākas nekā vidējās klases mežizstrādes mašīnai John Deere 1070 E ar H 754 darba galvu. Savukārt, John Deere 1070 D vidējais ražīgums (1.7 m³ E₁₅ h⁻¹) atstājis būtisku ietekmi uz kokmateriālu ražošanas izmaksām, salīdzinājumā ar John Deere 1070 E – tās palielinājusās par 72%. Kokmateriālu sagatavošanas izmaksu salīdzinājums starpcirtē izmantotajām mežizstrādes mašīnām parādīts 3.11. tabulā.

3.11. tabula. Kokmateriālu sagatavošanas izmaksu salīdzinājums dažādām mežizstrādes mašīnām /

Table 3.11. Comparison of timber production costs for different harvesters

Rādītāji / Indicators	John Deere 1070 E	Rottne H 8	John Deere 1070 D
Kopējās izmaksas, EUR gadā / <i>Summary of costs, EUR per year</i>	141 399	131 300	142 477
Ieguldījumi / <i>Investment costs</i>	45 720	38 281	46 747
Darbaspēks / <i>Labour costs</i>	53 363	53 363	53 363
ekspluatācijas izmaksas / <i>Operational costs</i>	35 583	33 403	35 583
plānotā peļņa / <i>Profit margin</i>	6733	6252	6785
Ražīgums, m ³ E ₁₅ h ⁻¹ / <i>Productivity, m³ E₁₅ h⁻¹</i>	5.6	5.0	1.7
Kopējais sagatavotais kokmateriālu apjoms, m ³ gadā / <i>Total amount of timber, m³ per year</i>	17 521	15 488	5319
apaļie kokmateriāli / <i>Roundwood</i>	13 568	11 740	4359
enerģētiskās koksne no stumbra atliekām / <i>Solid biofuel and stem residues</i>	1050	1209	52
enerģētiskā koksne no mežizstrādes atliekām / <i>Biofuel and logging residues</i>	1411	1247	428
mizas un citi atlikumi / <i>Bark and other residues</i>	1492	1291	480
Enerģētiskā koksne ber. m ³ gadā / <i>Biofuel, LV m³ per year</i>	5906	5896	1152

3.11. tabulas turpinājums/ continuation of the Table 3.11.

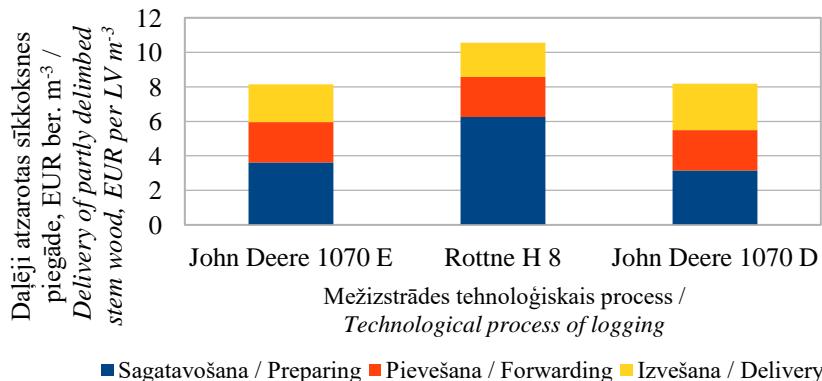
Rādītāji / Indicators	John Deere 1070 E	Rottne H 8	John Deere 1070 D
Vidējās kokmateriālu sagatavošanas izmaksas, EUR m ⁻³ / Average timber preparation costs, EUR LV m ⁻³	7.6	8.5	26.8

Analizējot vidējās efektīvās darba stundas izmaksas, sagatavojot kokmateriālus, labāki rādītāji iegūti, starpcirtē izmantojot John Deere 1070 E un Rottne H8 (46 EUR E₁₅ h⁻¹), savukārt mežizstrādes mašīnai John Deere 1070 D vidējās darba stundas izmaksas bija lielākas (49 EUR E₁₅ h⁻¹). Par 10% samazinoties mežizstrādes mašīnu noslodzei (efektīvo darba stundu skaitu) gadā, vidējās efektīvās darba stundas izmaksas mežizstrādes mašīnai Rottne H8 palielinās par 3 EUR E₁₅ h⁻¹, bet vidējas klasses mežizstrādes mašīnām John Deere 1070 D un John Deere 1070 E par 4 EUR E₁₅ h⁻¹.

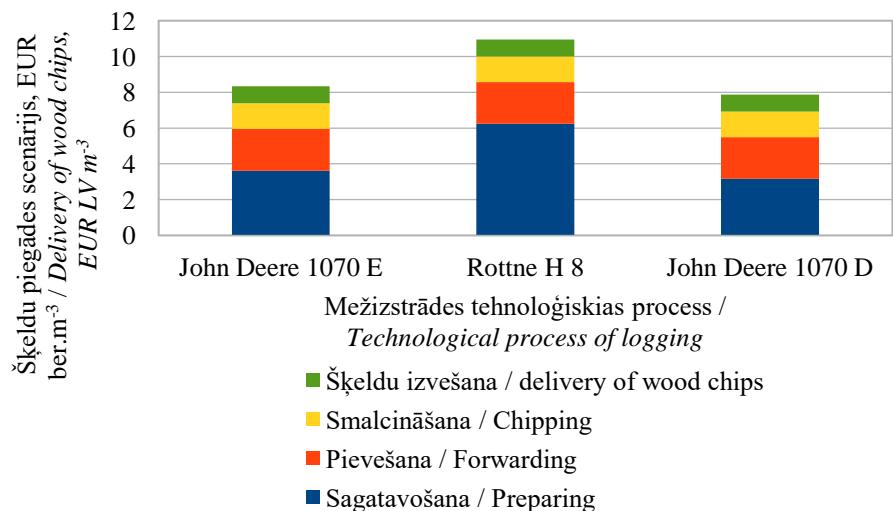
Salīdzinot dažādu mežizstrādes mašīnu un tehnoloģisko procesu izmaksas, lietderīgi veikt salīdzinājumu relatīvā izteiksmē, jo, piemēram, atalgojums un plānotā tehniskā pieejamība un noslodze var būtiski ieteikmēt darba stundas izmaksas, attiecīgi, arī salīdzinājumu.

Kopējās enerģētiskās koksnes ražošanas izmaksas ietver ne vien sagatavošanas, bet arī pievešanas, smalcināšanas un izvešanas, jeb mežistrādes tehnoloģiskā procesa izmaksas. Aprēķinos izmantoti līdzšinējos pētījumos iegūtie vidējie rādītāji, kas raksturo ieguldījuma, darbaspēka un ekspluatācijas izmaksas, kā arī vidējie ražīguma rādītāji. Enerģētiskās koksnes piegādē galapatērētajam iespējams izvēlēties divus piegādes scenārijus. Scenāriju izvērtējumā pieņemts, ka visām mežizstrādes mašīnām vidējā nozāgētā koka D_{1.3} = 8 cm. Pirmais no scenārijiem paredz piegādāt daļēji atzarotu sīkkoksnī, kuras pārstrādi veic galapatērētājs. Izmantojot šo scenāriju, atkarībā no izvēlētās mežizstrādes mašīnas, kokmateriālu sagatavošanas, piegādes un izvešanas izmaksas ir no 8.1 (John Deere 1070 E) līdz 10.5 (Rottne H8) EUR ber. m⁻³ (3.9. att.).

Saskaņā ar otro scenāriju enerģētisko koksni smalcina augšgala krautuvē un gala patērētajam piegādā šķeldu veidā. Kokmateriālu sagatavošanas, pievešanas, smalcināšanas un sagatavoto šķeldu izvešanas izmaksas atkarībā no izmantotās mežizstrādes mašīnas ir no 7.9 (John Deere 1070 E) līdz 11.0 (Rottne H8) EUR ber. m⁻³ (3.10. att.).



3.9. att. Ražošanas izmaksas daļēji atzarotas sīkkoksnes piegādes scenārijā
Fig. 3.9. Production costs in partly delimbed stem wood supply scenario



3.10. att. Ražošanas izmaksas šķeldu piegādes scenārijā /
Fig. 3.10. Production costs in wood chips supply scenario

Līdzšinējie pētījumi liecina, ka daļēji atzarotas sīkkoksnes piegādes scenārijs ir viena no iespējām, kā sagatavotos kokmateriālus nogādāt galapatētājam (Kalēja et al., 2014). Promocijas darba ietvaros veiktie aprēķini parāda, ka, izvēloties daļēji atzarotas sīkkoksnes piegādes scenāriju, mežizstrādes

tehnoloģiskā procesa izmaksas iespējams samazināt no 2% (John Deere 1070 E) līdz 5% (Rottne H8). Kaut arī iegūtie rezultāti parāda, ka noteiktos apstākļos daļēji atzarotas sīkkoksnes piegādes scenārija izmantošana ļautu samazināt mežizstrādes tehnoloģiskā procesa izmaksas, Latvijā praksē šis scenārijs netiek izmantots, un līdzīgos pētījumos pierādīts, ka kokvedēju mazā ietilpība no ekonomiskā viedokla padara to izmantošanu mazāk efektīvu salīdzinājumā ar šķeldu vedēju (Kalēja et al., 2014). Enerģētiskās koksnes gatavošanā, izmantojot John Deere 1070 D, šķeldu piegādes scenārijs salīdzinājumā ar daļēji atzarotas sīkkoksnes piegādes scenāriju ļauj par 2% samazināt mežizstrādes tehnoloģiskā procesa izmaksas. Šķeldu piegādes scenārijs kā ekonomiski efektīvākais atzīts arī līdzīgos pētījumos (Kalēja et al., 2014) un praksē to izmanto mežizstrādes tehnoloģiskajā procesā.

Pētījuma rezultāti apstiprina darbā izvirzīto tēzi par enerģētiskās koksnes sagatavošanas rentabilitāti, izvēloties atbilstošu tehniku. Vidējās klasses mežizstrādes mašīna John Deere 1070 E ar standarta darba galvu, kas aprīkota ar papildu satvērejiem, izmēģinājumos nodrošināja relatīvi mazākas kokmateriālu un enerģētiskās koksnes ražošanas izmaksas, neatkarīgi no izmantotās darba metodes (vidējās kokmateriālu sagatavošanas izmaksas 7.6 EUR m^{-3} ; vidējā nozāgētā koka augstums 12.3 m ; $D_{1.3} = 8.8 \text{ cm}$; vidējais stumbra tilpums 0.04 m^3). Tajā pašā laikā standarta tehnikas izmantošana teorētiski ļauj palielināt tehnikas izmantošanas efektivitāti un samazināt tehnikas pārvietošanas izmaksas, veicot mežizstrādi arī starpcirtēs un galvenajā cīrtē nelielu dimensiju koku audzēs.

Ar Bracke C.16 darba galvu aprīkotās John Deere 1070 D mežizstrādes mašīnas izmantošana izrādījās salīdzinoši neefektīvs risinājums (vidējās kokmateriālu sagatavošanas izmaksas 26.8 EUR m^{-3}), taču šīs tehnikas vienības efektivitāti būtiski ietekmēja ievērojami mazākas nozāgējamo koku dimensijas (vidējā nozāgētā koka augstums 8 m ; $D_{1.3} = 4.3 \text{ cm}$; vidējais stumbra tilpums 0.01 m^3) pie vienādiem audzes parametriem, kas savukārt izriet no darba metodes. Strādājot ar vidējās klasses mežizstrādes mašīnu, kas aprīkota ar Bracke C.16 darba galvu, bija jānozāgē arī dimensijās mazus kokus, kā rezultātā palielinās darba laika patēriņš gan kokmateriālu sagatavošanas, gan izvešanas procesā. Bracke C.16 darba galvas pielietošanas efektivitāti var būtiski palielināt darba metodes izmaiņas, izmantojot kādu no simetriskās kopšanas metodēm un izvairoties no mazāko koku un krūmu zāgēšanas.

SECINĀJUMI

1. Saskaņā ar MSI 3. cikla (2014–2019) datiem mežaudzes, kurās valdaudzes koku augstums ir 9–12 m, aizņem 7% no kopejās meža platības Latvijā. Lielākā daļa jeb 63% šādu meža platību atrodas pārējo īpašnieku mežos. Teorētiski pieejamie enerģētiskās koksnes resursi šados mežos ir 7054 tūkst. m³ (virszemes biomasa 4091 tūkst. t_{sausnas}), tajā skaitā valsts mežos atrodas vien 27% jeb 1927 tūkst. m³ (virszemes biomassas 1109 tūkst. t_{sausnas}), bet pārējos mežos teorētiski pieejami 5127 tūkst. m³ (virszemes biomassas 2982 tūkst. t_{sausnas}).
2. Tehnoloģiski pieejamiem resursiem attiecīgajās meža platībās atbilst 530 tūkst. t ciršanas atlieku un 798 tūkst. m³ malkas jeb kopā 4588 tūkst. MWh enerģētiskās koksnes, pārvēršot to primārajā energijā, un tikai 19% no resursiem koncentrēti valsts mežos. Šim resursu veidam ir neliela saimnieciskā nozīme, taču mašinizēta starpcirte laikus neizkoptās meža platībās, gatavojot enerģētisko koksni, var sekmēt mežaudžu vērtības pieaugumu nākotnē.
3. Mašinizētā starpcirte vislabākie ražīguma rādītāji sasniedzami, izmantojot darba metodi, kas no visiem nozāgētajiem kokiem paredz gatavot daļēji atzarotus sīkkoksnes sortimentus. Būtiski ($p = 0.01 < 0.05$) labāki vidējie ražīguma rādītāji izmēģinājumos sasniegti, izmantojot vidējās klases mežizstrādes mašīnu John Deere 1070 E, kas aprīkota ar H 754 darba galvu, t.i. izplatītāko vidējās klases mežizstrādes risinājumu kopšanas cirtēs Latvijā.
4. Mazās klases mežizstrādes mašīnas (Rottne H8 ar EGS 405 darba galvu) kopējās izmaksas gada griezumā ir līdz 16% mazākas, nekā vidējas klases mežizstrādes mašīnas (John Deere 1070 E ar H 754 darba galvu) izmaksas un to lielā mērā ietekmē salīdzinoši mazākas ieguldījumu izmaksas. Tomēr, starpcirte izmantojot John Deere 1070 E mežizstrādes mašīnu, vidējās enerģētiskās koksnes sagatavošanas izmaksas, pateicoties labākiem ražīguma rādītājiem, ir par 15% mazākas.
5. Vidējās klases mežizstrādes mašīna John Deere 1070 E ar H 754 darba galvu izmēģinājumos nodrošināja relatīvi mazākas enerģētiskās koksnes ražošanas izmaksas, neatkarīgi no izmantotās darba metodes. Ar Bracke C.16 darba galvu aprīkotās John Deere 1070 D mežizstrādes mašīnas izmantošana izrādījās salīdzinoši neefektīvs risinājums, taču šīs mašīnas efektivitāti būtiski ietekmēja ievērojami mazākas nozāgējamo koku dimensijas pie vienādiem audzes parametriem, kas savukārt izriet no darba metodes. Efektivitāti var būtiski palielināt, izmantojot kādu no simetriskās kopšanas metodēm un izvairties no mazāko koku un krūmu zāgēšanas.
6. Mežizstrādes mašīnu noslodze (efektīvo darba stundu skaits) gadā būtiski ietekmē efektīvās darba stundas vidējās izmaksas. Par 10% samazinot mašīnu noslodzi, mazās klases mežizstrādes mašīnai Rottne H8 efektīvās

darba stundas izmaksas palielinās par 6%, bet vidējās klasses mežizstrādes mašīnām John Deere 1070 D un John Deere 1070 E par 7–8%. Tajā pašā laikā standarta tehnikas izmantošana ļauj palielināt tehnikas izmantošanas efektivitāti un samazināt tehnikas pārvietošanas izmaksas, veicot mežizstrādi arī starpcirtēs un galvenajā cirtē nelielu dimensiju koku audzēs.

7. Kaut arī aprēķinu rezultāti parāda, ka noteiktos apstākļos daļēji atzarotas sūkkoksnes piegāde ļautu samazināt mežizstrādes tehnoloģiskā procesa izmaksas par 2% (John Deere 1070 E) līdz 5% (Rottne H8), Latvijā šo scenāriju praksē neizmanto. Enerģētisko koksni galapatērētajam piegādā galvenokārt, izmantojot šķeldu piegādes scenāriju, kas pētījuma ietvaros atzīts kā ekonomiski pamatots mežizstrādes tehnoloģiskā procesa risinājums, enerģētiskās koksnes gatavošanā izmantojot galvenokārt mazu dimensiju kokus.

PATEICĪBAS

Promocijas darba autore izsaka pateicību darba zinātniskajiem vadītājiem Dr.silv. Andim Lazdiņam un Dr. sc.ing Ziedonim Sarmulim par atbalstu un sniegtajiem padomiem darba izstrādē un tā kvalitātes pilnveidošanā. Pateicība Latvijas Lauksaimniecības universitātes Meža fakultātes profesoram (Emeritus) Dr. sc. ing. Alfonam Grīnfeldam par atbalstu un noderīgajiem padomiem uzsākot doktorantūras studiju procesu.

Darba autore izsaka pateicību Latvijas Valsts mežzinātnes institūtam “Silava” par iespēju izstrādāt darbu paralēli tiešo darba pienākumu veikšanai, kā arī par iespēju promocijas darba izstrādē izmantot akciju sabiedrības “Latvijas valsts meži” pasūtītā pētījuma “Meža darbu mašinizācijas un biokurināmā pētījumu programma” ietvaros iegūtos datus.

Darba autore izsaka pateicību Latvijas Valsts mežzinātnes institūta “Silava” Meža atjaunošanas un ieadzēšanas un Meža darbu un meža enerģētikas radošo grupu kolēgiem par palīdzību empīrisko materiālu ievākšanā un pēcapstrādē.

1. GENERAL DESCRIPTION OF THE THESIS

1.1. Relevance of the topic

Historically, the owners have managed the forest in such a way as to ensure the sustainable availability of resources and obtain the most economically important forest product – timber. The growing demand for wood products makes it necessary to look for new, scientifically and practically based solutions for the improvement of forestry practices and wood supplies. Wood biofuel is dominant renewable energy resource in Latvia, which still has the greatest potential for increasing use. Changes in the approach to the use of wood could promote the development of Latvia's energy sector by achieving the goals set in the Sustainable Development Strategy of Latvia until 2030, which are related to increasing the share of energy produced using renewable energy to 40% of gross final energy consumption. Previous research shows that the largest theoretically obtainable unused wood biofuel reserves in thinnings are found in stands between 21 and 30 years of age. As different technical and technological solutions are possible in the use of these resources, it is important to evaluate not only the theoretical but also the technological and economic availability of resources before expanding production. The mechanization of thinnings, which is generally linked to the extraction of wood biofuel, is mainly hampered by economic factors. Previous studies in the Nordic countries have shown that the productivity of harvesters of similar size and capacity achieved under similar conditions does not differ significantly, which suggests that medium-sized harvesters, which are currently widely used in the final felling areas in Latvia, can be used in mechanized thinnings for the production of wood biofuel. The topicality of the research is determined also by the fact that there is still an unanswered question about the most suitable technical and technological solution for wood biofuel extraction in mechanized thinning, evaluating the factors influencing machine productivity, as well as evaluating the economic benefits of mechanized thinning.

1.2. The aim, tasks and thesis of the Doctoral Thesis

The aim of the Doctoral Thesis is to investigate, which factors have significant impact on productivity and costs of biofuel production, to evaluate wood resources in forest stands, where thinning has been delayed, and to elaborate proposals for mechanization of thinnings.

The following research tasks of the doctoral thesis were set:

- 1) To estimate the available wood resources in young stands, where thinning has been delayed, and the technologically available wood biofuel resources in such stands in Latvia.

- 2) To investigate, which factors affect productivity of forest operations and prime cost of wood biofuel production in thinning implemented either mechanically or using a chainsaw.
- 3) To evaluate the impact of different mechanization solutions on the profitability of wood biofuel production.

The following research hypothesis has been proposed in the study: in forest stands, where pre-commercial thinning has been delayed, mechanized biofuel production is feasible.

1.3. Scientific novelty and practical significance of the Doctoral Thesis

Although wood biofuel, which can be obtained by means of mechanized thinnings, is one of the sources of renewable energy in Latvia, the use of which still has potential, production costs are relatively high and hinder the use of this resource. In order to efficiently manage the biomass resources in young forest stands, it is necessary to find the most suitable technologically and economically viable harvesting solutions, which at the same time do not have adverse effect on the growth of forest stands. At present, in Latvia, the calculation of felling costs is not performed using a unified cost calculation model. Typically, production cost calculations are performed by each service provider for each production phase individually with limited knowledge about possible optimization solutions.

The results obtained in the research provide an insight into the technological solutions and working methods of mechanized thinning in the forest areas, where mainly wood biofuel can be obtained. The cost calculation model, which has been supplemented and adapted for the calculation of costs in felling works within the framework of the research, provides an opportunity to perform economic evaluation of wood biofuel production, as well as allows to calculate the total costs of the technological process of the logging.

Research in this direction provides a broader picture of which factors must be considered more carefully and which must be given more attention to in order to make wood biofuel's harvesting during mechanized thinning even more efficient from both a forestry and an economic point of view. Using the production cost calculation model developed within the scope of the Doctoral Thesis, the calculated values are comparable and evaluable in each of the cost positions, which provides an opportunity to identify items that could be reduced by changing or adapting the technology.

1.4. Approbation of research results

The research results have been published in six scientific articles and presented in seven scientific conferences.

1.5. Structure and volume of the Doctoral Thesis

The structure of the Thesis is formed in accordance with the research tasks set in the Thesis paper. The paper consists of three chapters, the first of them reflects the description of the problem in research conducted by other authors and their conclusions; an insight into the availability of wood biofuel's resources in Latvia and the possibilities to use these resources; the history of the organization of logging operations and the used technologies as well as the possibilities of current mechanized logging; the current achievements in performing mechanized thinning, as well as the factors influencing the productivity of mechanized logging; the role of wood biofuel in the context of renewable energy resources and the role of this resource in the national economy. The second chapter describes the methodology of determining theoretically, technically and technologically available resources of wood biofuel; the research objects are described, as well as the installation of sample plots and the methodology of data collection; a description of the harvesters used in the thinning, a description of the selected working methods and conditions, as well as the methods of data collection during the trials and analysis of obtained data; the model for calculating the costs of wood biofuel production. Within the framework of the research the model for calculating the costs has been adapted to the technological processes of logging in Latvia. In the third chapter, the assessment of wood biofuel resources is performed; productivity indicators obtained by mechanized thinning are evaluated and the factors which the most significantly affect the productivity and costs are identified; an assessment of wood biofuel production costs has been performed and recommendations for extraction of biofuel are provided.

The volume of the dissertation is 72 pages; information is summarized in 23 tables and 24 figures, 95 literature sources were used, 7 conclusions were formulated at the end of the work and 9 appendices were added.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Determining the availability of wood biofuel resources

In the assessment of the theoretical, technical and technological availability of resources, the data of National Forest Inventory 3rd cycle (2014 – 2019) obtained in forest areas with 9 – 12 m high trees were used.

In this research, the theoretically available wood biofuel resources are treated as the resources available in forest stands where the number of trees or basal area after the harvesting of strip roads does not decrease below the minimum threshold of number of trees or basal area according to national legislation. Theoretically, this kind of wood biofuel resources is also available in nature protection areas.

When extracting the technically available wood biofuel resources from the theoretically available resources, the further calculations do not include forest areas where, based on the forest type, the extraction of trees during thinning is not recommended, e.g. stand types *Cladinoso-callunosa*, *Callunosa turf. mel.* and *Callunosa mel.*, as well as from the technological point of view it is not easy to implement wood biofuel extraction in forest stand types with wet organic soils, specifically, *Cladinoso-sphagnosa*, *Vaccinioso-sphagnosa*. Protected nature territories are also excluded from the calculation (Lazdiņš et al., 2012).

Technically available resources are a part of technologically available biomass, separated from production losses (in average 30% for logging residues and 5% for firewood, Adamovičs et al., 2009). The wood biofuel resources that can be extracted only when soil is frozen have been separately allocated (Lazdiņš et al., 2012).

2.2. Description of research objects

In accordance with the goal of the research and the defined tasks, 10 forest stands in state forests with a total area of 27.8 ha were selected for the collection of empirical material. The trial objects are concentrated in Central part of Latvia (Vidusdaugava region). The average tree height of the superior stand (9–12 m) and stand density (number of trees ≥ 2000 pieces ha^{-1}) were used as stand selection criteria. Three deciduous stands were selected for trials – silver birch (*Betula pendula* Roth) and 7 coniferous stands – Norway spruce (*Picea abies* (L.) H.Karst.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.).

Empirical material for the research was collected in 2013 and 2014.

All selected stands have been cut down to the minimum number of trees or basal areas by thinning “from below”, which involves cutting of the smallest and non-viable trees outside the strip roads.

The strip roads are spaced at a distance of 15, 18, 20 or 30 m from each other. “Ghost paths” are used for harvesting if the distance between strip roads exceeds 20 m.

2.3. Description of the forest machinery used in the research

Within the framework of the research, mechanized thinnings was performed using 3 different harvesters, the heads of which are additionally equipped with stem accumulating device.

With a medium-sized harvester John Deere 1070 E (unladen weight 15.5 tons, engine power 136 kW at 1900 rpm $min.^{-1}$), equipped with H754 head (weight 820 kg, maximum stem diameter 55 cm, 5 moving knives, 1 fixed knife, 4 feed rollers, maximum boom reach 10 m), work time records for 127 working hours were obtained within the scope of the research.

With a medium-sized harvester John Deere 1070 D (unladen weight 14.1 tons, engine power 136 kW at 1900 rpm min.⁻¹), equipped with a Bracke C16.b head (weight 570 kg, maximum stem diameter 26 cm, maximum boom reach 10 m), work time records for 66 working hours were obtained within the scope of the research.

With a small-size harvester Rottne H8 (unladen weight 10.2 tons, engine power 125 kW at 2000 rpm min.⁻¹), equipped with EGS 406 head (weight 480 kg, maximum stem diameter 33 cm, 2 moving knives, 2 feed rollers, maximum boom reach 7 m), work time records for 262 working hours were obtained within the scope of the study.

2.4. Description of working methods used in the research

Two working methods were used in the trials. Both methods consider leaving of undergrowth trees, as long as they do not interfere with thinning. Also, regardless of the choice of method, when sawing trees that are not intended for the production of standard roundwood, the stem accumulating device is used to the maximum. The term “partly delimbed stem wood” means wood biofuel (not longer than 6 m) made from undelimbed tops, logging residues and undergrowth trees with average diameter at breast height (DBH) < 6 cm.

The first of the used working methods envisages the production of all timber assortments according to the product groups adopted by JSC “Latvia’s state forests”. While working with this method, assortments of partly delimbed stem wood (length from 2.5 to 3 m, minimum top diameter – 3 cm) were produced.

The second working method envisages the production of partly delimbed stem wood biofuel from all felled trees, except for undergrowth trees with DBH < 4 cm.

2.5. Accounting of mechanized thinning work time and calculation of productivity indicators

The chronometric timing method has been used to acquire data on the work time use in thinning, which considers recording the use of direct work time and is intended for logging of the duration and sequence of the basic elements of the work process at their cyclic repetition. To determine the duration of work elements, continuous timing was performed, which is suitable for the study of work operation elements continuing for at least 10 seconds (Bludiņš & Rudze, 1979). During the time studies the engine time of the harvesters is adjusted to record operating hours, stopping the timing when the engine is stopped and resuming it as soon as the engine is restarted.

The work time consumption is determined for each work cycle separately. When recording work time, additional information fields are filled in on the field

computer, providing information on the diameter of the felled tree at the cutting site (D_0) using a Rottne H8 or DBH using both John Deere harvesters. Information fields on the number of trees processed per work cycle were also filled in, notes on interruptions in work, moving the machine to another strip road were also made, as well as name or ID of an operator who performed thinning.

Productivity indicators were calculated from work time accounting data separately for different stands, harvesters, working methods and operators. Stand wise and single tree data are used in the productivity estimates.

The use of working day (shifts) includes all the work time looged during the study when the engine is running. Productive work time is obtained by deducting the inefficient work time from the total work time. The inefficient work time is spent for repairs (provided that the engine of the harvester continues to run at the time of recording the work time) and the time spent on activities not direct associated with harvesting operation.

2.6. Calculation of wood biofuel production costs

For cost calculation, the model developed within the COST project FP0902 (Ackerman et al., 2014) was used, however, it was supplemented with standard economic methods and adapted for cost calculation in felling works, as well as for trading of produced materials, covering the whole technological process of logging (Kalēja et al., 2018a).

In the calculation model, costs are distributed by their types or cost items per unit of a product or service (Alsiņa et al., 2011). The calculation of production costs includes both direct production costs that are directly related to the creation of specific cost objects, cost process and activity, and general or indirect costs that are not directly related to the production of the specific product, but are conditionally related to the production process and are included in production costs using the addition rate (Vitola & Soopa, 2002; Alsiņa et al., 2011). The determination and distribution of indirect costs by calculation objects was performed according to the volume of production or time period.

The production cost calculation uses empirical data obtained from long-term observations (information provided by technical service providers and service companies on technical maintenance costs) and published data which includes machine cost analysis. Cost items include investment costs, personnel costs, and operating or maintenance costs (Brinker et al., 2002; Alsiņa et al., 2011; Ackerman et al., 2014).

In order to calculate the costs of the logging technological process as accurately as possible and the cost model would be suitable for different conditions, specific indicators such as machine productivity and factors influencing it – average diameter of felled trees, number of felled trees, average load size, number of equipment relocation per year, average delivery distance and average driving speed were used in calculations.

For the conversion of cubic meters (m^3) to lose volume cubic meters (LV m^3) a coefficient of 2.5 is used in the calculations following to practical experience in biomass terminals. The load size is determined by load weighing or calculated on the basis of the dimensions of the loaded timber.

The production cost calculation model is intended for calculating hourly (productive hours, operating hours and planned working hours) and unit costs for each of the phases of the logging technological process.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Evaluation availability of wood biofuel resources

According to the National forest inventory (NFI) 3rd cycle (2014 – 2019) data, forest areas with tree height of 9 – 12 m occupy 7% of all forests (234 thous. ha with a total stem volume of 15 524 thous. m^3). Most or 63% (149 thous. ha) of such forest stands are located in the forests owned by private companies, persons and municipalities.

Calculations show that the theoretically available wood biofuel resources in thinnings concentrated in forest areas, where the number of trees or basal area does not decrease below the minimum threshold after strip roads are harvested, amount to 7054 thous. m^3 of stem wood (4091 thous. tons_{dry} above-ground biomass, of which only 27% is located in state forests (1927 thous. m^3 of stem wood or 1109 thous. tons_{dry} above-ground biomass). In other forests the theoretically available stock is 5127 thous. m^3 of stem wood or 2982 thous. t_{dry} above-ground biomass.

The total theoretical distribution of theoretically available tree above-ground biomass by forest stand types according to NFI 3rd cycle data is shown in Figure 3.1. Most (59%) of the total theoretically available above-ground tree biomass is located on dry mineral soils (*Vacciniosa*, *Myrtillosa*, *Hylocomiosa*, *Oxalidosa* and *Aegopodiossa*), including 30% in state forests. In poor mineral soils *Cladinoso-callunosa*, where 4% of the theoretically available wood biofuel resources are located mainly in state forests, the extraction in thinning is not recommended due to risk of significant reduction of the stock of organic matter (Skudra & Dreimanis, 1993). In private and municipal forests, growing stock available for extraction in delayed thinning in the *Cladinoso-callunosa* and *Vacciniosa* forest types is negligible.

In forest types with organic soils (*Sphagnosa*, *Caricoso-phragmitosa* and *Dryopterioso-caricosa*) 16% of the theoretically available resources are located. These figures differ by ownership - in the state forests 28% of the theoretically available wood biofuel resources are located in forests with organic soils and only 11% in forests of other owners. Although the proportion of resources concentrated in these forest types is relatively high, the conditions are not suitable for mechanized thinning due to potentially low soil bearing capacity

(Saliņš, 1987; Liepa et al., 2014). In forest types with drained mineral soils (*Vacciniosa mel.*, *Myrtillosa mel.* and *Mercurialisosa mel.*) 14% of the total theoretically available wood biofuel resources are located. This share is bigger in state forests (18%) and smaller in other forests (12%). In nutrient poor *Vacciniosa mel.* the resources are available only in the state forests. From the point of view of soil bearing capacity, mechanized thinning can be done both in summer and in winter (Saliņš et al., 1987; Liepa et al., 2014). Theoretically available wood biofuel resources located in forests with wet mineral soils (*Myrtillososphagnosa*, *Vaccinioso-sphagnosa* and *Myrtillosa-polytrichosa*) are 6% of the total. This figure is much higher in state forests (16%) and only 2% in other forests. No theoretically available wood biofuel resources are found in forests with nutrient poor wet mineral soil (*Cladinoso-sphagnosa*) and the richest forests with wet mineral soil (*Dryopteriosa*). From the point of view of soil bearing capacity, mechanized thinning in forests with wet mineral soils is possible in all seasons (Saliņš & Rasnacis, 1985; Saliņš, 1987; Liepa et al., 2014), however, forests can be significantly affected by changes in climatic conditions, thus making wood biofuel collection technologically difficult and highly risky from silvicultural point of view due to ruts formation. The share of theoretically available biofuel resources in forest types with drained organic soils (*Callunosa turf. mel.*, *Vacciniosa turf. mel.*, *Myrtillosa truf.mel.* and *Oxalidosa turf. mel.*) are relatively small (5%) of the total. No significant difference is found between state (8% of the total) and other (5%) forests. Nutrient poor drained organic soils (forest type *Callunosa turf. mel.*) holding 1% of the total theoretically available resources, is not suitable for wood biofuel production. In forest types on drained organic soils mechanized biofuel extraction in thinning is possible only in winter, during the frost period (Saliņš et al., 1987; Liepa et al., 2014). In the most cases distribution of resources follows to proportion of distribution of the forest types.

Previous studies show that the average extractable stock of stem-wood in forest areas with 9 – 12 m high trees is 30 – 50 m³ (Lazdiņš et al., 2013). According to the calculations, the higher average volume of stem wood (by cutting down trees in forest areas up to the minimum threshold of number of trees or basal area) in state forests is smaller (20 m³ ha⁻¹) than in other forests (30 m³ ha⁻¹). The largest average volume of extractable stock of stem-wood (31 m³ ha⁻¹) is characteristic in forest types with organic soils, in state forests it is 31 m³ ha⁻¹ and depending on the forest type varies from 42 m³ ha⁻¹ in *Dryopterioso-caricosa* to 20 m³ ha⁻¹ in *Sphagnosa*. In other forest types with organic soils, the average stock is 31 m³ ha⁻¹, or from an average of 14 m³ ha⁻¹ in *Sphagnosa* to 43 m³ ha⁻¹ in *Caricoso-phragmitosa*. Also, a relatively large average extractable stock of stem-wood (26 m³ ha⁻¹) is characteristic for stand with dry mineral soils. In state forests it is 17 m³ ha⁻¹, or from an average of 9 m³ ha⁻¹ in *Aegopodiosoa* to 30 m³ ha⁻¹ in *Cladinoso-callunosa*. In turn, in other forest areas on dry mineral soils, the average felling stock is 31 m³ ha⁻¹, or from an average of 25 m³ ha⁻¹ in *Myrtillosa* to 35 m³ ha⁻¹ in *Oxalidosa*. In forest types with wet mineral soils, the average extractable stock of stem wood is 20 m³ ha⁻¹,

and in state forests it is on average $18 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, or from an average of $8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in *Dryopteriosa* to $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in *Vaccinioso-sphagnosa*. In other forests with wet mineral soils, the average stem wood volume to be harvested is $29 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, from an average of $13 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in *Myrtillosa-polytrichosa* to $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in *Dryopteriosa*. In forest types on drained mineral soils, the average stem wood stock to be felled is $19 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. In the state forests they are on average $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, or from an average of $8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in the arena of *Vacciniosa mel.* to $28 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in the arena of *Mercurialiosa mel.*. In other forests on drained mineral soils, the average extractable stock of stem-wood is $25 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, from an average of $22 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in *Myrtillosa mel.* to $28 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in *Callunosa mel.*. According to the calculations, the smallest average extractable stock of stem-wood ($16 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) is observed in forest types on wet organic soils (*Sphagnosa*, *Caricoso-phragmitos*a and *Dryopteriso-caricosa*). In state forests on wet organic soils they are $19 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, from $8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in *Vacciniosa turf. mel.* to $26 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in *Oxalidosa turf. mel.*. In other forests with organic soils, the average stock to be felled is $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, or from $7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in *Oxalidosa turf. mel.* to $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ in *Vacciniosa turf. mel..*

Analyzing the theoretically available stem wood volume resources in forest areas with average tree height of 9 – 12 m, depending on the dominant tree species, it must be concluded that in state forests the majority (69%) of resources are located in coniferous stands –respectively, 45% in pine stands and in 24% spruce stands. Deciduous stands contain 31% of the resources. In other forests, the theoretically available stem wood resources are concentrated mainly in deciduous tree stands (87%), mostly in forest areas where the dominant species is white alder (38%). Coniferous stands in other forests account for 13% of the theoretically available resource potential.

The assessment of technically available wood biofuel resources shows that in forest areas with the average tree height of 9 – 12 m 757 thous. tons of logging residues and 886 thous. m^3 of firewood are technically available for mechanized thinning. State forests holds 20% of technically available resources, but the most of the resources are concentrated in other forests (605 thous. tons of logging residues and 715 thous. m^3 of firewood).

The evaluation of technologically available resources shows that 530 thous. tons of logging residues and 798 thous. m^3 of firewood, or a total of 4588 thous. MWh of primary energy is available for mechanised thinning. Only 19% of technologically available wood biofuel resources are concentrated in state forests. Most or 3686 thous. MWh technologically available primary energy resources are concentrated in other forest areas. 27% of the total technologically available resources can be extracted in winter and less than half (38%) of the resources accessible only in winter are located in the state forest.

Assuming that these resources are extracted within 5 years, the average amount of primary energy accessible every year is 180 thous. MWh in state-owned and 737 thous. MWh in other forests, excluding potential increase of stock in areas suitable for wood biofuel production.

3.2. Productivity indicators of mechanized thinning

3.2.1. Characteristics of prepared timber

When using John Deere 1070 E with H754 felling head in mechanized thinning, the proportion of felled trees with a stem volume not exceeding 0.1 m^3 is 94%. When working with Rottne H8 with EGS 406 felling head and John Deere 1070 D with Bracke C.16 felling head, the proportion of felled trees with stem volume not exceeding 0.1 m^3 is 82.7% and 99.8% of the total number of felled trees, respectively. Comparing the data obtained in thinning using chainsaws, it was concluded that in stands with an average tree height of 9–12 m, the stem volume of most or 94.4% of the felled trees does not exceed 0.1 m^3 (Figure 3.2.). This finding is in line with conclusions of earlier studies about considerable proportion of undergrowth trees in stands that have not been systematically maintained and about negative effect of the undergrowth trees on the productivity of harvesters (Lazdāns et al., 2006).

Indicators characterizing the dimensions of trees felled in thinning and the extracted stock is given in Table 3.1. In total 16.7 thous. trees were felled with a John Deere 1070 E harvester resulting in 591 m^3 of timber extracted. The average height of the felled tree was 12.3 m, but the DBH = 8.8 cm (average stem volume 0.04 m^3). Within the scope of the Rottne H8 trials 17.9 thous. trees were felled resulting in 1089 m^3 of timber extracted, the average height of the felled tree was 11.4 m, but the DBH = 10.2 cm (average stem volume 0.07 m^3). In the areas where the John Deere 1070 D harvester with Bracke C.16 was used, 13.4 thous. trees were felled resulting in 86 m^3 of biomass. The average height of the felled trees was 8.0 m, but the DBH = 4.3 cm (average stem volume 0.01 m^3). In thinning with a John Deere 1070 D with Bracke C.16 felling head, the number of the felled trees is relatively large, however, the amount of biomass produced is relatively small. The situation could be explained by the fact that a relatively large proportion of the felled trees (Figure 3.2) are undergrowth and small trees, which according to the terms of reference were not intended to be sawn, unless they interfere with the execution of works. Working with Bracke C.16 this requirement is not easy to fulfil.

Visualizing the extracted volume by the stem volume groups, it was found that most of the volume prepared timber (from 67.6% with Rottne H8 to 95.3% with John Deere 1070 D) is produced from trees with a stem volume not exceeding 0.15 m^3 . A similar situation was observed in trials with chainsaw (Kaleja et al., 2015), when stem volume of 98.3% of sawn trees did not exceed 0.15 m^3 .

3.2.2. Average productivity of harvesters

In total duration of time studies during the research corresponded to 456 operating hours.

In average 158 trees were processed in the productive hour using John Deere 1070 E resulting in 5.6 m^3 of timber extracted. The average productivity per productive hour (excluding the time spent entering and leaving the stand) is 5.8 m^3 (average volume of the processed tree 0.03 m^3). The average productive work time of the total work time (duration of shift) is 83.5%, while 4.6% of the productive work time is spent to enter and to leave the stand.

When working with the Rottne H8 harvester, 81 trees were processed in an average per productive hour producing of 5.0 m^3 of timber. The average achieved productivity is $5.3 \text{ m}^3 \text{ E}_{15} \text{ h}^{-1}$ (average volume of the felled stem 0.06 m^3), excluding the time spent entering and leaving the stand. The average productive work time of the total work time is 83.7%, including 6.1% of the productive work time entering and leaving the stand. According to the results, the share of productive work time in total work time is relatively high and is higher than found (81.6%) in similar studies in mechanized thinnings (Sirén, 2003).

With the John Deere 1070 D harvester 271 trees were processed in an average productive hour resulting in productivity of $1.7 \text{ m}^3 \text{ E}_{15} \text{ h}^{-1}$ of wood biofuel. The average achieved productivity is $1.8 \text{ m}^3 \text{ E}_{15} \text{ h}^{-1}$ (average volume of felled tree 0.01 m^3), if the time spent entering and leaving the stand is excluded from calculation. The average share of productive work time of the total work time is 75.2%, including 3.4% of the productive work time spent for entering and leaving the stand. Although the number of trees processed per productive hour is relatively high, productivity was significantly affected by the small dimensions of the felled trees, which is in line with the findings of similar studies (Sirén, 2003). Also, operators did not fully follow the methodological instructions by cutting trees with the DBH $< 3 \text{ cm}$, even if they do not interfere with the harvesting operations (Table 3.2.).

Comparing the average productivity indicators of different harvesters used in the trials, depending on the volume of the felled stem, is provided in Fig. 3.3. The best results were achieved with John Deere 1070 E equipped with H 754 felling head, followed by John Deere 1070 D with Bracke C16.b head and Rottne H8 with EGS 405 felling head. Significant differences ($p < 0.05$) were found when comparing productivity of John Deere 1070 E and Rottne H8 harvesters. Although comparative studies using a chainsaw did not take place in the research trials, data obtained in other stands with similar tree dimensions were used to compare productivity (Kalėja et al., 2015). Overall, chainsaw productivity is significantly lower ($p < 0.05$ compared to John Deere 1070 E, John Deere 1070 D and Rottne H8). As the volume of the felled stem increases, the productivity increases, however, when certain tree dimensions are reached (for John Deere 1070 E – 0.33 m^3 ; for Rottne H8 – 0.32 m^3 ; and for John Deere 1070 D – 0.16 m^3), productivity remains at the same level.

The regression function can explain 91.5% (John Deere 1070 E), 81.9% (Rottne H8) and 80.4% (John Deere 1070 D) of the changes in the productivity depending from dimensions of extracted trees. When using a chainsaw, 50.3% of the changes in productivity can be explained by the regression function. When assessing the significance of the regression equation, the p-value of the F-test is less than 0.05 in all cases, which means that the regression equations statistically significantly explain the changes in the productivity, depending on the DBH or volume of the processed trees. The coefficients of the regression equations characterizing the performance of the machines and a chainsaw used in thinning are given in Table 3.3.

Comparing the proportion of work time elements in the productive time per 1 m³, it was found that delimiting/cross-cutting and boom-out are the most time consuming operations, respectively, from 20.6% with John Deere 1070 E to 31.6% with Rottne H8 and from 12.8 % with Rottne H8 to 33.6% with John Deere 1070 E. The least time consuming work element is transferring of tops and branches to another location, e.g. strip road (from 0.1% with John Deere 1070 E to 1.6% with Rottne H8). This is explained by good work conditions. The next the least time consuming operation is felling (from 3% with Rottne H8 to 8.1% with John Deere 1070 E). The time spent entering, moving in the stand and leaving the stand is calculated as the average value for each of the harvesters used in the thinning. These indicators are greatly influenced by the stand shape and size. The productive time spent entering and leaving the stand ranged from 1.3% for John Deere 1070 E to 2.2% for Rottne H8 and from 2.1% for John Deere 1070 E to 3.9% for Rottne H8.

3.2.3. Influence of the working method on productivity indicators

Two working methods were compared in the thinning. The first working method envisages the production of the assortments specified in the standard work order by JSC “Latvia’s state forests” and production of wood biofuel from tree tops and stems, which are not suitable for the production of other roundwood assortments. The working method also envisages the maximum use of stem accumulating device in the production of wood biofuel. The second work method envisages the production of wood biofuel (partly delimbed stem wood) from all felled trees ensuring maximum use of stem accumulating device. Harvester with Bracke C.16 felling head produces undelimbed biomass. Crosscutting is done if extracted stems are longer than 6 m.

While working with the first working method (John Deere 1070 E and Rottne H8 harvesters), 1176 m³ of timber was extracted (17 724 work cycles), and with the second method (John Deere 1070 E and John Deere 1070 D harvesters) – 119 m³ of timber was extracted (3138 work cycles). Higher average productivity was achieved using 2nd working method. A comparison of forest machine-specific indicators between the working methods used is presented in Table 3.4.

Comparing the average productivity in the group of the respective stem volume, using the 1st working method during thinning, better result was achieved using John Deere 1070 E harvester with standard felling head. The difference is statistically significant ($p = <0.05$). Significantly higher average productivity values were achieved both when processing small dimensional trees (Rottne H8 reported 33% lower productivity compared to John Deere 1070 E in the group of wood volume $> 0.01 \text{ m}^3$) and bigger (in the group of wood volume $0.06 - 0.07 \text{ m}^3$ the productivity of the Rottne H8 is 29% lower than that of the John Deere 1070 E). When the volume of the stem reaches 0.45 m^3 , the productivity of John Deere 1070 E harvester stops increasing (Fig. 3.4.).

The regression equation can explain 90.3% (John Deere 1070 E) and 62.6% (Rottne H8) of the changes in productivity using 1st working method in thinning. The assessment of the significance of the regression equation shows that the p-value of the F-test is less than 0.05 in all cases, which means that the regression equations statistically significantly explain the changes in the productivity. The results of the regression analysis of the productivity of 1st working method for each of the harvesters is given in Table 3.5.

Comparing the average productivity indicators in the respective stem volume group, using 2nd working method in thinning, better productivity was achieved using John Deere 1070 E harvester with standard felling head, moreover, the difference is statistically significant ($p < 0.05$, Fig. 3.5.). John Deere 1070 E harvester shows significantly higher average productivity, both for small trees (if the stem volume is $< 0.01 \text{ m}^3$, the productivity of John Deere 1070 D with Bracke C.16 felling head is by 29% lower than that of John Deere 1070 E) and bigger (if the average volume of a stem is 0.26 m^3 , the productivity of John Deere 1070 D is by 47% lower than of John Deere 1070 E). The relatively small average volume of processed stem (only 0.01 m^3) is one of the main factors influencing the productivity of John Deere 1070 D – despite the operators' active use of the stem accumulation mechanism (on average 5.2 trees treated in a work cycle), the average productivity is relatively low. When the stem volume reaches 0.6 m^3 , productivity of John Deere 1070 E also stops to increase.

The regression equation can explain 96.1% (John Deere 1070 E) and 80.4% (John Deere 1070 D) of the changes in productivity using 2nd working method in thinning. The assessment of the significance of the regression equation shows that the p-value of the F-test is less than 0.05 in all cases, which means that the regression equations statistically significantly explain the changes in the productivity. The results of the regression analysis of the productivity of 2nd working method for each of the harvesters is given in Table 3.6.

3.2.4. Influence of harvester operator on productivity indicators

Similar studies have concluded that operators' work habits have a significant impact on forest machine productivity (Kärhä et al., 2004), so the performance

of operators using different working methods has been taken into account when analyzing the impact of working methods on the productivity.

Work with John Deere 1070 E harvester using 1st working method, which involves the production of standard assortments and partly delimbed stem wood assortment, using to a maximum stem accumulating device, was performed by two operators (hereinafter A and B). Rottne H8 harvester, on the other hand, was operated by four operators (hereinafter – C, D, E and F).

The average productivity of John Deere 1070 E harvester acquired by both operators is similar, however, when analyzing the changes in average productivity in different stem volume groups (Fig. 3.6) statistically significant ($p = <0.05$) differences are observed, when processing trees with a volume of more than 0.1 m³, the average productivity reported by operator A are significantly better. The average productivity reported by different operators of Rottne H8 harvester also differed statistically significantly ($p = <0.05$) in different stem volume groups and the average productivity, depending on the operator, ranged from 4.2 m³ (average stem volume 0.06 m³) for operator C to 6.8 m³ the volume of the felled stem 0.08 m³) for operator E (Table 3.7.).

The differences in the productivity can be explained by a different approach to the choice of trees to be processed, which affects the time of felling and delimiting, as well as the efficiency of the use of work time. The operator who has demonstrated the worst productivity indicators also has the lowest share of productive time in total work time (80.7%). Using the equation to calculate productivity at different volumes of processed trees (from 0.01 to 0.10 m³), the productivity of operators increases from 1.3 to 6.2 m³ E₁₅ h⁻¹ for operator C; from 1.1 to 6.9 m³ E₁₅ h⁻¹ for operator D; from 1.4 to 9.0 m³ E₁₅ h⁻¹ for operator E and from 1.5 to 7.3 m³ E₁₅ h⁻¹ for operator F (Fig. 3.6.).

The regression equation can explain 94.6% of John Deere 1070 E, operator A; 86.1% John Deere 1070 E, operator B; 79.3% Rottne H8, operator C; 46.9% Rottne H8, operator D; 65.7% Rottne H8, operator E; and 65.7% Rottne H8, operator F, changes in productivity depending from dimensions of processed trees when using working method 1 in mechanized thinning. The assessment of the significance of the regression equation shows that the p-value of the F-test is less than 0.05 in all cases, which means that the regression equations statistically significantly explain the changes in the productivity. The results of the regression analysis of the average productivity indicators typical for operators can be seen in Table 3.8.

Using 2nd working method, which envisages the production of only wood biofuel in the mechanized thinning, the work was performed by two John Deere 1070 E operators (A and B) and one John Deere 1070 D operator (G). The best average productivity (4.5 m³ E₁₅ h⁻¹ at an average stem volume of 0.05 m³) was shown by John Deere 1070 E operator B (Table 3.9.).

Although the average productivity for the operators differed when comparing the productivity achieved when processing stems of different volumes (Fig. 3.7.), no statistically significant differences were found between operators ($p > 0.05$).

Using the equation to calculate productivity rates at different stem volumes (from 0.01 to 0.10 m³), the productivity rates reported by operators increase from 1.7 to 7.8 m³ E₁₅ h⁻¹ John Deere 1070 E, Operator A; from 2.1 to 13.8 m³ E₁₅ h⁻¹ John Deere 1070 E, operator B; from 1.9 to 10.9 m³ E₁₅ h⁻¹ John Deere 1070 D, operator G.

The regression equation can explain 65.9% of John Deere 1070 E, operator A; 96.4% John Deere 1070 E, Operator B; and 80.4% of John Deere 1070 D, Operator G, changes in productivity when working with 2nd working method. The assessment of the significance of the regression equation shows that the p-value of the F-test is less than 0.05 in all cases, which means that the regression equations statistically significantly explain the changes in the average productivity. Operator-specific results of regression analysis of average productivity are provided in Table 3.10.

When using 1st working method, the productivity achieved by John Deere 1070 E harvester varies from 1.2% (stem volume 0.05 m³) to 38% (stem volume 0.07 m³) for the operators involved in the tests, depending on the volume of the processed trees.

Using 2nd working method, the productivity achieved by John Deere 1070 E harvester operators varies from 0.4% (stem volume 0.04 m³) to 59% (stem volume 0.02 m³), depending on the volume of the logs cut.

3.3. Economic efficiency of mechanized thinning

One of the main factors influencing the choice of a harvester for mechanized thinning in forest areas with 9 – 12 m high trees is labour costs. The issue of increasing the productivity and economic profitability of harvesters is still relevant for service buyers, as well as for service providers. Previous research has shown that the use of technology allows to increase productivity by at least 16% (Bergström, 2009; Bergström et al., 2010; Lazdiņš, 2012), thus improving the economic benefits of mechanized thinning and wood biofuel production.

Thinning mainly produces stem wood suitable for the production of wood biofuel (the volume of the most of stems is from 0.01 to 0.10 m³), therefore it is important to find a balance between the costs of timber production and the market price at which the produced timber can be sold. In the analysis of the costs of mechanized timber preparation, the average productivity indicators obtained in the trials were used and the cost of productive hours for each of the used harvesters was calculated. For both medium-sized harvesters, the average productive hourly cost is calculated to be 49 EUR, while the cost-effective hourly cost for a small-sized harvester is 46 EUR, i.e. 6% smaller. Hourly labour costs are significantly affected by assumptions about operators' remuneration, the technical readiness and efficiency of machinery, which can double the estimated hourly labour costs. The obtained results show that the timber preparation costs

of medium-sized harvester John Deere 1070 E are lower than with the other two harvesters used (Fig. 3.8.).

Researchers from different countries have carried out productivity studies in order to develop the most accurate possible models for calculating timber production costs, which allow predicting expected and actual production costs. To calculate the costs of wood biofuel production, the supplemented and adapted cost calculation base model developed within the activity of COST project FP0902 is used, which envisages cost calculation both for individual logging operations and system costs of the logging (Kalēja et al., 2018b).

In timber preparation, the costs of all tested harvesters were compared with the costs and productivity values specific to each machine. Timber production costs consist of three groups of cost items and projected profit. Labour costs account for the largest share of the total annual cost and range from 37% (John Deere 1070 E) to 41% (Rottne H8). Investment costs are the second largest cost item and range from 29% (Rottne H8) to 34% (John Deere 1070 D), depending on the harvester used. Total operating costs range from 21% (Rottne H8) to 25% (John Deere 1070 E and John Deere 1070 D), respectively.

Using medium-sized harvesters John Deere 1070 E and John Deere 1070 D in logging operations, at the achieved average productivity of each machine, it is possible to prepare during the year (2880 productive hours), respectively 14 thous. m³ of timber and 6 thous. LV m³ of wood biofuel, working with John Deere 1070 E, and 5 thous. m³ of timber and 1 thous. LV m³ of wood biofuel when working with John Deere 1070 D. The small-sized harvester Rottne H8 prepares 15 thous. m³ of timber and 6 thous. LV m³ of wood biofuel per year (average achieved productivity 5 m³ E₁₅ h⁻¹; 2880 productive hours). Average timber preparation costs are significantly affected by machine productivity (Table 3.11). The lowest timber production costs were achieved using John Deere 1070 E harvester (average productivity 5.6 m³ E₁₅ h⁻¹). With Rottne H8 harvester, the average timber production costs are 11% (average capacity 5 m³ E₁₅ h⁻¹) higher than with John Deere 1070 E harvester with H 754 felling head. On the other hand, the average productivity of John Deere 1070 D (1.7 m³ E₁₅ h⁻¹) has had a significant impact on timber production costs, compared to John Deere 1070 E – they have increased by 72%. A comparison of timber preparation costs for harvesters used in thinnings is shown in Table 3.11.

The smaller average productive hourly labour costs for timber preparation were calculated for John Deere 1070 E and Rottne H8 (46 EUR E₁₅ h⁻¹) in thinning, while the John Deere 1070 D harvester had higher average hourly labour costs (49 EUR E₁₅ h⁻¹). With a 10% reduction in harvester work load (productive hours) per year, the average productive hour cost of Rottne H8 harvester increases by 3 EUR E₁₅ h⁻¹ and for John Deere 1070 D and John Deere 1070 E harvesters – by 4 EUR E₁₅ h⁻¹.

When comparing the costs of different harvesters and technological processes, it is useful to make a comparison in relative terms, because wages and

planned technical availability and workload can have a significant impact on hourly labor costs and the whole comparison results.

The total costs of wood biofuel production include not only the costs of production, but also the costs of forwarding, comminution and delivery, or the technological process of logging. The calculations use average values obtained in earlier studies, which characterize investment, labour and operating costs, as well as average productivity. It is possible to choose two delivery scenarios in the supply of wood biofuel to the final consumer. It is assessed in the scenario evaluation that the average DBH = 8 cm for all harvesters. The first of the scenarios involves the supply of partly delimbed logs to the consumer. In this scenario, the costs of timber production, delivery and removal ranges from 8.1 EUR LV m⁻³ (John Deere 1070 E) to 10.5 EUR LV m⁻³ (Rottne H8, Figure 3.9.).

In the 2nd scenario, the wood biofuel is shredded at the roadside and delivered to a consumer in the form of wood chips. The costs of production, forwarding, chipping and delivery of produced chips ranges from 7.9 EUR LV m⁻³ (John Deere 1070 E) to 11.0 EUR LV m⁻³ (Rottne H8, Fig. 3.10.).

Previous studies show that the scenario of delivery of partly delimbed logs is one of the possibilities to deliver the prepared timber to a consumer (Kalēja et al., 2014). The calculations made in the thesis show that by choosing the scenario of delivery of partly delimbed stem wood, the costs of the wood biofuel delivery can be reduced from 2% (John Deere 1070 E) to 5% (Rottne H8). Although the obtained results show that in certain conditions the use of the partly delimbed stem wood supply scenario would reduce the costs of logging, in Latvia this approach is not used in practice and similar studies show that small capacity of roundwood trucks makes their use less economically efficient (Kalēja et al., 2014). Production of wood biofuel using John Deere 1070 D in the wood chips supply scenario reduces the costs of the logging process by 2% compared to the whole tree supply scenario. The wood chips supply scenario has also been recognized as the most cost-effective in similar studies (Kalēja et al., 2014) and in this approach is also used in practice.

The results of the research confirm the hypothesis of the study about the profitability of wood biofuel production by choosing the appropriate technique. John Deere 1070 E harvester with a standard felling head equipped with additional grippers demonstrated relatively the smallest timber and wood biofuel production costs, regardless of the working method applied (average timber preparation costs 7.6 EUR m⁻³; average extracted tree height 12.3 m, D_{1.3} = 8.8 cm, average stem volume 0.04 m³). At the same time, the use of standard equipment theoretically allows to increase the efficiency of the use of equipment and reduce the costs of relocation of equipment, performing logging in thinnings and regenerative felling of small trees, e.g. grey alder stands.

The use of John Deere 1070 D harvester with a Bracke C.16 head proved to be a relatively inefficient solution (average biomass production costs 26.8 EUR m⁻³), but the efficiency of this unit was significantly affected by

significantly smaller dimensions of the felled trees (average felled tree height 8 m ; $D_{1,3} = 4.3$ cm; average stem volume 0.01 m³) at the same stand parameters, which in turn comes from the working method. When working with a medium- sized harvester equipped with a Bracke C.16 felling head also have to be extracted resulting in an increased work time consumption during harvesting and forwarding of biomass. The efficiency of the Bracke C.16 head can be significantly increased by changing the working method using one of the symmetrical working methods and avoiding the extraction of the smallest trees and shrubs.

CONCLUSIONS

1. According to the data of the 3rd cycle of the National Forest Inventory (2014 – 2019), forest stands with an average tree height of 9 – 12 m occupy 7% of the total forest area in Latvia. Most, or 63%, of such forest areas are in the forests of owned by companies, private persons and municipalities. The theoretically available wood biofuel resources in these forests are 7054 thous. m³ (above-ground biomass 4091 thous. tons_{dry} matter), of which only 27% or 1927 thous. m³ (above-ground biomass 1109 thous. tons_{dry} matter) are in state forests, but in other forests theoretically 5127 thous. m³ (above-ground biomass 2982 thous. tons_{dry} matter) are available.
2. Technologically available resources in the respective forest areas correspond to 530 thous. tons of logging residues and 798 thous. m³ of firewood, or a total of 4588 thous. MWh of primary energy and only 19% of resources are concentrated in state forests. This type of resource has little economic importance, but mechanized thinning in poorly managed forest stands can contribute to the increase of the value of forest stands in the future.
3. In mechanized thinning, the highest productivity can be achieved by using a working method that envisages production of partly delimbed stems from all extracted trees. Significantly ($p = 0.01 < 0.05$) better performance in the trials was achieved using a medium-sized harvester John Deere 1070 E with an H 754 felling head, i. e. the most common medium-sized logging solution in thinning in Latvia.
4. The total annual cost of a small-sized harvester (Rottne H8 with EGS 405 head) is up to 16% lower than that of a medium-sized harvester (John Deere 1070 E with H 754 head) and is largely influenced by relatively lower investment costs. However, when using a John Deere 1070 E harvester for thinning, the average cost of production of wood biofuel is 15% lower due to better productivity.
5. The medium-sized harvester John Deere 1070 E with H 754 head ensured relatively lower wood biofuel production costs, regardless of

- the working method used. The use of a John Deere 1070 D harvester with a Bracke C.16 head proved to be a relatively inefficient solution, but the efficiency of this machine was significantly affected by large proportion of small dimension trees and bushes felled, which, in turn, was a result of the working method applied. Efficiency can be significantly increased by using one of the symmetrical maintenance methods and by avoiding cutting the smallest trees and shrubs.
6. The work load of harvesters (number of productive hours) per year significantly affects the average cost of a productive hour. By reducing machine load by 10%, the cost of productive hour of Rottne H8 harvester increases by 6% and by 7 – 8% - of the John Deere 1070 D and John Deere 1070 E harvesters. At the same time, the use of standard equipment allows to increase the efficiency of the harvesters' use, reduce the costs of relocation of machines and increase diversity of economic activities.
 7. Although the results of the study proves that in certain circumstances the supply of partly delimbed stem wood would allow to reduce the prime cost of harvesting and delivery of biomass by 2% using John Deere 1070 E and by 5% using Rottne H8, in Latvia this scenario is not used in practice due to other circumstances. Wood biofuel is mainly supplied to the final consumer using a wood chips supply scenario, which has been recognized in the study as an economically viable solution in wood biofuel targeted thinning.