

Latvijas Valsts mežzinātnes institūts "Silava"

Latvijas Lauksaimniecības universitāte

Meža fakultāte

Meža izmantošanas katedra

Mg.sc.ing. **Agris Zimelis**

**promocijas darbs**

SKUJU KOKU CELMU IEGUVES UN TRANSPORTĒŠANAS  
TEHNOLOĢISKS RISINĀJUMS  
***TECHNOLOGY FOR EXTRACTION AND TRANSPORTATION  
OF CONIFEROUS STUMPS***

zinātnes doktora *Ph. D.* zinātniskā grāda iegūšanai Mežzinātnē

**nozārē Lauksaimniecības un zivsaimniecības zinātnes, mežzinātne**

Promocijas darba vadītājs  
Dr.sc.ing. Ziedonis Sarmulis

---

Promocijas darba vadītājs  
Dr.silv. Andis Lazdiņš

---

Promocijas darba autors

---

## ANOTĀCIJA

Zimelis A. Skuju koku celmu ieguves un transportēšanas tehnoloģisks risinājums. LVMI Silava un LLU, 2020. Darba apjoms 75 lpp.

Celmu izstrāde plašāk zināma Skandināvijas valstīs. Plašāki pētījumi par šo atjaunojamo koksnes energoresursu iegūvi tiek veikti, sākot ar 1970. gadu. Sākotnēji šī resursa izmantošana saistīta ar plānoto celulozes rūpnīcu izejvielu nodrošinājumu. Tagad Somijā celmu koksnes ieguve jau vairākus gadus tiek realizēta ražošanā kā biodeģvielas avots. Piemēram, 2005. gadā šī izejmateriāla izmantošana koģenerācijas ciklā sastādīja 0.4 milj. m<sup>3</sup>. Pirmie pētījumi šajā virzienā 21. gadsimtā Latvijā veikti 2006. gadā. Celmu raušana eksperimentāli ir veikta AS "Latvijas valsts meži" (LVM) un SIA "Rīgas meži". Agrāk šo resursu pielietoja arī ķīmiskā rūpniecībā, iegūstot kolofoniju, terpentīnu un to tālākas pārstrādes produktus.

Darbā, balstoties uz Meža valsts reģistra (MVR) un Meža resursu monitoringa datiem, novērtēti kopējie pieejamie celmu koksnes energoresursi. Kopējais celmu resursu daudzums skuju koku izcirtumos atbilst 103 tūkst. GWh primārās enerģijas izteiksmē, no kuriem tehniski iegūstamais ikgadējais apjoms atbilst 349 GWh primārās enerģijas. Lielākā daļa iegūstamās biomasas ir damakšņa un vēra tipos. Analizējot kopējos pieejamos resursus, lielākā daļa jeb 62% ir iegūstami AS "Latvijas valsts meži" (LVM) apsaimniekotajos mežos un 38% pārējos mežos.

Celmu izstrādes energoefektivitātes raksturošanai kopējā tehnoloģiskajā procesā izmantoti līdz šim visi pētījumu objekti Latvijā, kuros veikta celmu izstrāde biokurināmā sagatavošanai. Datu analīzē ietverti dati par 3022 celmu izstrādi.

Modelējot energoefektivitātes rādītājus, identificēta nepieciešamība ietvert aprēķinos datus par augsnes sagatavošanu, veicot to vienlaicīgi ar celmu izstrādi. Līdz ar to tika uzsākti teorētiski aprēķini, lai modelētu celma rāvēja darbību pie dažādiem scenārijiem. Aprēķini balstās uz teorētiskās mehānikas likumiem, pēc kuriem nosakāma tehnikas stabilitāte, ko ietekmē galvenokārt izraujamā celma caurmērs un atrašanās vieta. Tieši šie faktori maina nepieciešamos tehniskos parametrus – ekskavatora pašmasu, nepieciešamo hidraulikas caurplūdi un citus svarīgus rādītājus. Balstoties uz šiem aprēķiniem, pētījumā izstrādātas un aprobētas darba metodes celmu raušanai-plēšanai.

Kā efektīvākais pielietojamais tehnoloģiskais variants celmu koksnes ieguvei darbā ieteikts: celmu izstrādi veikt ar Latvijā uzbūvēto celmu rāvēju-plēsēju MCR 500 II, pievešanu veicot ar vidējās klases forvarderu (analīzē iekļauts John Deere 810D forvarders), celmu drupināšanai starpkrautuvē izmantojot jaudīgu biomasas drupinātāju, piemēram, CBI Magnum Force 6800P un drupināto koksni gala patērētājam piegādāt, izmantojot autovilcienu ar vismaz 90 m<sup>3</sup> ietilpību (analīzei izmantots Volvo FM autovilciens). Izmantojot šo tehnoloģisko shēmu, kopējais enerģijas izmantošanas lietderības koeficients ir 3.9. Tas nozīmē, ka celmu koksnes tālākā izmantošanā iegūstamais enerģijas daudzums būs lielāks salīdzinājumā pret pievadāmo enerģijas daudzumu ieguves procesā.

Pētījuma rezultāti apkopoti 11 zinātniskos rakstos un, balstoties uz pētījuma rezultātiem, sagatavoti un saņemti 2 Latvijas patenti celmu raušanas-plēšanas un augsnes gatavošanas iekārtām.

## ANNOTATION

Zimelis A. Technology for extraction and transportation of coniferous stumps: PhD thesis - Salaspils: Latvian State Forest Institute (LSFI) 'Silava' and Jelgava: Latvia University of Life Sciences and Technologies, 2020, 75 p. The thesis contains of 19 tables and 29 figures.

Stump harvesting has been well studied in Scandinavian countries. More detailed studies on stumps as a renewable wood energy resource have been carried out since 1970ies. From the beginning this type of wood resource was linked with planned supply materials for pulp mills. For instance, in Finland for the last couple of decades the extraction of stump wood is carried out as a source for biofuel where in 2005 more than 0.4 mil m<sup>3</sup> of raw material was used in the cogeneration cycle. First extensive studies in Latvia were done in 2006 where experimental stump harvesting have been performed in JSC 'Latvian State Forests' and LLC 'Rīgas Meži'. In the past this raw material was used in chemical industry for extraction of rosin, turpentine and their further refined products.

In this thesis the assessment of available stump wood energy resources was made using the data from State forest register (SFR) and National forest inventory (NFI). After summarizing abovementioned data, more than 103 thousand GWh of primary energy resource from stumps in clear-cuts of coniferous have been detected. Technically extracted annual amount of primary energy corresponds to 349 GWh. According to the Latvian forest typology largest amount of biomass was detected in *Hylocomiosa* and *Oxalidosa* forest types. The majority of available resources 62% can be obtained in state forests and 38% in other forests.

To characterize the efficiency of stump extraction in common technological process, in this study all previous studied sites where stump harvesting for biofuel purposes was performed in the territory of Latvia. In total data from 3022 stumps were included.

During the modelling process, in which energy efficiency parameters were detected, a need for additional information on soil preparation and stump harvesting was detected. Furthermore, theoretical calculations were started to model the stump operational process under different scenarios. These calculations were based on theoretical mechanical rules where technical stability is detectable, which is mainly depended on diameter on removable stump and site-specific location. Mostly, these two factors are crucial, where technical parameters such as excavator unladen weight, required hydraulic flow and other important parameters should be changed. Based on abovementioned calculation, in this study the elaboration and approbation of particular methods for stump pulling and crushing was done.

In the result of this study, it is suggested that the most effective technological approach of stump extraction using MCR 500 II stump lifting head (in additional, this feature is made in Latvia) with medium class forwarder (in this particular study John Deere 810D forwarder is included). Furthermore, for stump grinder it is suggested to use, for instance, CBI Magnum Force 6800P where delivery of grinded wood to the final consumer would be performed by the truck with a capacity at least 90 m<sup>3</sup> (in this study the Volvo FM truck is included). The use of this technology scheme, the total amount of energy efficiency factor is 3.9. This explains the fact that the amount of energy obtained from further use of the wood extracted from stumps will be higher compared to the amount of energy supplied in the extraction process.

The main results of the thesis are published in 11 scientific papers and based on research results two Latvian patents have been developed and approved for stump pull and crush, and soil preparation as a part of forestry technology.

# SATURS

ANOTĀCIJA.....	2
ANNOTATION.....	3
SATURS.....	4
TABULU SARAKSTS .....	5
ATTĒLU SARAKSTS .....	6
PUBLIKĀCIJAS PAR PROMOCIJAS DARBA TĒMU .....	7
LATVIJAS PATENTI.....	8
DALĪBA KONFERENCĒS .....	9
PROMOCIJAS DARBĀ LIETOTIE SAĪSINĀJUMI UN MĒRVIENĪBAS .....	10
PROMOCIJAS DARBA IEVADS.....	11
1. PROBLĒMAS IZZINĀTĪBAS APSKATS .....	13
1.1. Klimata izmaiņu samazināšana .....	13
1.2. Koksnes biomasa un tās izmantošanas iespējas .....	14
1.3. Celmu ieguves paņēmieni .....	17
2. PĒTĪJUMA MATERIĀLS UN METODIKA .....	21
2.1. Celmu koksnes resursu novērtējuma metodika .....	24
2.2. Celmu rāvēja darba paņēmieni un tehnisko prasību sagatavošanas metodika .....	26
2.2.1. Tehniskā specifikācija iekārtas izgatavošanai .....	27
2.3. Energobilances uzlabošanas metodika .....	35
2.4. Energoefektivitātes uzlabošanas tehnoloģijas izstrādes metodika .....	36
2.4.1. Celmu uzmērīšana un marķēšana pirms izstrādes .....	36
2.4.2. Celmu raušanas – plēšanas metodika .....	37
2.4.3. Celmu pievešanas izpētes metodika .....	38
2.4.4. Celmu transportēšana uz starpkrautuvi.....	39
2.4.5. Celmu drupināšana .....	40
2.4.6. Drupinātās energokoksnes tālākais transports.....	40
2.4.7. Energoatēriņa uzskaitē.....	40
2.5. Datu apstrāde.....	43
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA.....	45
3.1. Celmu resursu pieejamība Latvijā.....	45
3.2. Ražīguma analīze celmu koksnes sagatavošanas tehnoloģiskajā procesā .....	47
3.2.1. Pētījumu objektu raksturojums .....	47
3.2.2. Celmu izstrāde .....	51
3.2.3. Celmu pievešana.....	57
3.2.4. Celmu transportēšana uz starpkrautuvi.....	61
3.2.5. Celmu drupināšana .....	61
3.2.6. Drupinātās koksnes transports .....	62
3.3. Augsnes sagatavošanas izvērtējums, izmantojot MCR-500 II.....	63
3.4. Celmu izstrādes energoresursu patēriņa bilance .....	63
SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS .....	68
IZMANTOTĀ LITERATŪRA .....	70

## TABULU SARAKSTS

1.1. tabula.	Celmu raušanas – plēšanas iekārtu salīdzinājums.....	17
2.1. tabula.	Izmēģinājumu objektu raksturojums SIA “Rīgas meži” platībās.....	23
2.2. tabula.	Izmēģinājuma objekti LVM platībās.....	23
2.3. tabula.	Parametru vērtības.....	24
2.4. tabula.	Augsnes gatavošana ar pasīvo disku frēzi.....	35
2.5. tabula.	Celmu raušanas – plēšanas darba laika uzskaites elementi.....	37
2.6. tabula.	Celmu grupas.....	38
2.7. tabula.	Pievešanas darba laika sadalījums.....	39
2.8. tabula.	Drupināšanas darba laika sadalījums .....	40
2.9. tabula.	Degvielas uzskaites sistēmas AIC-904 tehniskie parametri.....	42
2.10. tabula.	Fosila kurināmā uzskaites sadalījums .....	433
3.1. tabula.	Kopējie celmu koksnes biomasas resursi .....	45
3.2. tabula.	Potenciāli pieejamais celmu biokurināmā apjoms .....	46
3.3. tabula.	Pētījuma objektu apskats .....	47
3.4. tabula.	Produktīvā darba laika patēriņa sadalījums pa elementiem, min $t_{sausnu}$ .....	53
3.5. tabula.	Ražīguma rādītāji pēc veiktajiem uzlabojumiem sadalījumā pa darba elementiem, $m^3 h^{-1}$ .....	56
3.6. tabula.	Produktīvā darba laika patēriņa sadalījums pa cirsēm, min uz kravu .....	60
3.7. tabula.	Vidējais iekrāvēja darba laika patēriņš, nodrošinot drupinātāja Doppstadt darbību .....	62
3.8. tabula.	Degvielas patēriņš autotransportam, celmu drupināšanas un sijāšanas iekārtām.....	66

## ATTĒLU SARAKSTS

1.1. att.	Ražošanas izmaksas galvenajā cirtē un starpcirtē .....	15
1.2. att.	Raušanas spēka (kN) un celmu diametra (cm) saistība .....	19
1.3. att.	Griezes momenta un diametra krūšu augstumā sakarība.....	20
2.1. att.	CBI vidēja izmēra celmu raušanas kauss.....	22
2.2. att.	MCR 500 celmu raušanas – plēšanas kauss .....	23
2.3. att.	Darba metodes celmu raušanā (pa kreisi CBI, vidū MCR-500 un pa labi uzlabota metodika MCR-500) .....	27
2.4. att.	Lielu celmu raušanas secība .....	28
2.5. att.	Sakarība starp celma izraušanas spēku un celma caurmēru .....	29
2.6. att.	Celmu raušanas spēka aprēķināšana .....	30
2.7. att.	Celma caurmēra (d) un hidromanipulatora ( $L_5$ ) izlices ietekme uz atbalsta kāpurķēžu reakciju.....	31
2.8. att.	Celma caurmēra (d) un darba virsmas slīpuma ietekme uz atbalsta kāpurķēdēm .	32
2.9. att.	Celma caurmēra (d) un leņķa ( $\varphi$ ) starp raušanas virzienu pret atbalsta virsmu ietekme uz stabilizējošo reakciju (R) kāpurķēdes bāzes ekskavatoram .....	33
2.10. att.	Celmu caurmēra (d) un celma augstuma ( $h_6$ ) ietekme uz izvilkšanas spēku, ja izvilkšanas spēka vektors ir horizontālā plaknē.....	33
2.11. att.	Pacilu struktūra – apvērsts velēnas slānis .....	35
2.12. att.	Celmu uzmērīšana .....	36
3.1. att.	Celmu koksnes ieguves apjomi sadalījumā pa meža tipiēm.....	46
3.2. att.	Kopumā uz energokoksni kā lētāku izejvielu netieši norāda.....	51
3.3. att.	Produktīvā darba laika sadalījums celmu raušanā .....	52
3.4. att.	Produktīvā darba laika patēriņš sadalījumā pa elementiem.....	54
3.5. att.	Uzlabojumi celma raušanas galvai MCR-500 II .....	55
3.6. att.	Produktīvā darba laika patēriņš pēc iekārtas uzlabojumiem.....	55
3.7. att.	Ražīgums produktīvajā stundā, strādājot ar CBI, $m^3 h^{-1}$ .....	56
3.8. att.	Ražīgums produktīvajā stundā, strādājot ar MCR-500 II, $m^3 h^{-1}$ .....	57
3.9. att.	Starpkrautuve pēc celmu koksnes drupināšanas .....	58
3.10. att.	Nepareiza tehnikas ekspluatācija un darba metožu neievērošana .....	58
3.11. att.	Sagatavoto stādvieta skaits .....	63
3.12. att.	Degvielas patēriņš, strādājot ar Komatsu PC210LC ekskavatoru, $L m^{-3}$ .....	64
3.13. att.	Degvielas patēriņš, strādājot ar New Holand E215B ekskavatoru, $L m^{-3}$ .....	64
3.14. att.	Degvielas patēriņš, strādājot ar forvarderu, $L m^{-3}$ .....	65

## PUBLIKĀCIJAS PAR PROMOCIJAS DARBA TĒMU

Publikācijas zinātniskos žurnālos un konferenču rakstu krājumos

1. Zimelis, A., Ariko, S., Saveļjevs, A. (2018). Исследования влияния различных факторов на поперечную устойчивость корчевателя, *Труды БГТУ*, с. 174–181.
  2. Zimelis, A., Lazdiņš, A., Sarmulis, Z. (2014). Productivity of stump extraction with MCR500 bucket in Latvia. *Arsa. Advanced Research in Scientific Areas*, pp. 310–313.
  3. Lazdiņš, A., Lazdāns, V., Kalēja, S., Zimelis, A., Prindulis, U., Kļaviņa, D., Rozītis, G. (2014) Celmu biokurināmā resursu un to pieejamības apskats egļu audzēs valsts mežos. *Mežzinātne*, 28(61), 166.–179. lpp.
  4. Zimelis, A., Lazdiņš, A., Sarmulis, Z. (2013). Comparison of productivity of CBI and MCR-500 stump lifting buckets in Latvia. *Proceedings of Research for Rural Development 2013*. Jelgava, pp. 59–66.
  5. Lazdiņš, A., Zimelis, A. (2012). System analysis of productivity and cost of stump extraction for biofuel using MCR 500 excavator head. *Proceedings of Research for Rural Development 2012*. Jelgava, pp. 62–68.
  6. Zimelis, A., Lazdāns, V., Lazdiņa, D. (2012). Evaluation of forest regeneration results after stump extraction in joint stock company 'Latvian state forests'. *Proceedings of Research for Rural Development 2012*. Jelgava, pp. 69–72.
  7. Lazdiņš, A., Zimelis, A. (2012). Productivity of stump lifting head MCR-500. *Mežzinātne*, 25(58), 42.–44. lpp.
- Publikācijas koferenču tēžu krājumos:
8. Makovskis, K., Lazdiņš, A., Zimelis, A., Gaitnieks, T. (2015) *Productivity and cost of stump extraction in forest stands heavily affected by root rot. Book of abstracts of international scientific conference of the forest sector Knowledge based forest sector 2015*. Riga, pp. 31–33.
  9. Lazdiņa, D., Lazdiņš, A., Zimelis, A. (2012). Comparison of productivity of soil scarification with conventional excavator bucket and moulder MPV-600. *Proceedings of OSCAR 2012*. Riga, LSFRI Silava, pp. 131–134.
  10. Lazdiņš, A., Zimelis, A., Gusarevs, I. (2012). Preliminary data on productivity of stump lifting head MCR-500. *Proceedings of Renewable Energy and Energy Efficiency*. Jelgava, Latvia University of Agriculture, pp. 150–155.

## LATVIJAS PATENTI

1. Lazdiņš, A., Lazdāns, V., Gusarevs, I., Zimelis, A., Kurmis, E., Dmitrijenko, V., Lazdiņa, D. (2013). Multifunkcionāla iekārta celmu raušanai-plēšanai ar pacilveida stādvieta veidošanu. LR patents Nr. 14769. Latvijas Republikas patentu valde.
2. Lazdiņš, A., Lazdiņa, D., Lazdāns, V., Gusarevs, I., Zimelis, A., Kurmis, E., Dmitrijenko, V. (2013). Iekārta pacilveida stādvieta veidošanai meža augsnēs. Latvijas patents Nr. 14692. Latvijas Republikas patentu valde.



## DALĪBA KONFERENCĒS

1. Zimelis, A. (2018). Technology and energy balance in stump harvesting with MCR500. 17<sup>th</sup> International Scientific Conference 'Engineering for Rural Development', Latvia University of Life Sciences and Technologies, Jelgava, Latvia, 23–25.05.2018.
2. Zimelis, A. (2015). Productivity and cost of stump extraction in forest stands heavily affected by root rot. Knowledge based forest sector, LSFRI 'Silava', Riga, Latvia, 04.–06.11.2015.
3. Zimelis, A. (2013). Comparison of Productivity of two stump lifting heads CBI and MCR-500 in Latvia. Annual 18<sup>th</sup> International Scientific Conference 'Reserch for Rural Development 2013', Latvia University of Life Sciences and Technologies, Jelgava, Latvia, May 2013.
4. Zimelis, A. (2012). Evaluation of Forest Regeneration Results After Stump Extraction in 2008 in Zemgales Forestry District of Join Stock Company 'Latvia State Forest'. Annual 18<sup>th</sup> International Scientific Conference 'Reserch for Rural Development 2012', Latvia University of Life Sciences and Technologies, Jelgava, Latvia, 16.–18.04.2012.

## PROMOCIJAS DARBĀ LIETOTIE SAĪSINĀJUMI UN MĒRVIENĪBAS

AER	– atjaunojamie energoresursi
AGK	– kokmateriālu augšgala krautuve
ANO	– Apvienoto Nāciju organizācija
CO <sub>2</sub>	– oglekļa dioksīds
CSP	– Latvijas Republikas Centrālā statistikas pārvalde
CTL (cut to length)	– sortimentu tehnoloģija mežizstrādē
DBH	– koka caurmērs 1.3 m augstumā no sakņu kakla
ES	– Eiropas Savienība
GWh	– gigavatstunda
ha	– hektārs
Hp	– jaudas mērvienība, zirgspēks
LGK	– kokmateriālu lejasgala krautuve
LVM	– AS “Latvijas valsts meži”
m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	– ražīgums izteikts kā sagatavotās koksnes apjoms uz vienu produktīvo stundu
MSI	– meža statistiskās inventarizācijas dati
MVR	– Meža valsts reģistrs
PJ	– petadžouls
SEG	– siltumnīcefekta gāzes
t <sub>sausnas</sub> h <sup>-1</sup>	– absolūti sausas koksnes masa sagatavota produktīvajā stundā
TWh	– teravatstunda

## PROMOCIJAS DARBA IEVADS

Pētnieks Ādolfs Frīdrihs Bode 19. gadsimta otrajā pusē Latvijā veica pirmos pētījumus saistībā ar biokurināmā sagatavošanu no celmiem. Vēlākajos 20. gadsimta sākuma pētījumos vērtēts celmu koksnes iegūstamais apjoms. Jau tajā laikā pētnieks Arvīds Kalniņš konstatēja, ka cirsmais iegūstamā celmu biokurināmā daudzums atbilst 30% no stumbra tilpuma (Kalniņš, 1944). Celmu koksnes tālāka izmantošana biokurināmā sagatavošanai plašu atzinību neieguva, ko var izskaidrot ar fosilo energoresursu plašāku izmantošanu.

Šobrīd attīstības progress meža nozarē ir radis dažādus risinājumus plašākai koksnes virszemes daļas izmantošanai, sākot no siltuma ieguves līdz mēbeļrūpniecībai un medicīnai. Pat izmantojot šos resursus pilnībā, cilvēku vajadzība pēc koksnes netiek pietiekami nodrošināta. Tādēļ, pieprasījumam turpinot strauji pieaugt, ir nepieciešams izpētīt un apgūt arī celmu koksnes resursus. Pašlaik celmu koksnes kopējie, potenciālie un tehniski pieejamie resursi valsts mērogā nav aprēķināti. Nav arī pieejama informācija par šī resursa īpatsvaru kopējā energoresursu bilancē, piemēram, cik energoefektīva ir celmu izstrāde, salīdzinot izlieto enerģiju un saražotajā biokurināmajā ieslēgto enerģiju.

Pēdējos gados strauji pieaug interese par meža biomasas izmantošanu enerģētikā. LVM jau sekmīgi apgūvusi enerģētiskās šķeldas ražošanu no mežizstrādes atliekām – zariem, galotnēm, atgriezumiem, sīkkokiem u.c. cirsmu izstrādes procesā iegūtiem koksnes pārpalikumiem.

Enerģētikas sektors cieši mijiedarbojas ar citiem sektoriem, tajā skaitā mežsaimniecību, un energoresursu cena var būtiski ietekmēt kopējo valsts ekonomisko izaugsmi. Politiskā līmenī ir svarīga bioenerģētikas prioritātes noteikšana (Pavļuts, 2013), tādējādi palielinot atjaunojamo energoresursu (AER) pašnodrošinājumu. Sagatavojot valsts līmeņa pamatdokumentus un izstrādājot attīstības prognozes, tuvākajā nākotnē prognozēts primāro energoresursu patēriņa straujš kāpums, kas skaidrojams ar ekonomisko izaugsmi un fosilo materiālu aizstāšanu. Lielākais primāro energoresursu patēriņš attiecas uz naftas produktiem, jo tos galvenokārt patērē transporta sektors. Kā nākamais lielākais seko dabasgāze, kuru galvenokārt izmanto elektroenerģijas ražošanā (LR Ekonomikas ministrija, 2013). Lielāko daļu no elektroenerģijas ražošanai patērētās dabasgāzes iespējams aizstāt ar AER, tostarp koksni. Koksnes izmantošanai enerģētikā ir priekšrocības – tā ir vietējas izcelsmes atjaunojams produkts. Kurināmās koksnes īpatsvars kopējā energoresursu patēriņā Latvijā ir 31%. Šo resursu izmantošanai Latvijā vērojams stabils pieaugums – no 46 tūkst. TJ 2008. gadā līdz 59.5 tūkst. TJ 2017. gadā. Kopējais energoresursu patēriņš valstī veido 191 PJ, kas ir par 3% vairāk nekā iepriekšējā uzskaites periodā (CSP, 2019). Savukārt Zviedrijā valsts kopējais patēriņš ir 483 PJ, no kuriem 23% saražoti, izmantojot AER koksni (Ericsson & Werner, 2016). Realizējot Eiropas Savienības, tostarp Latvijas, klimata un enerģētikas politiku, būtiski pieaugs enerģijas gala patēriņš, kur daļu būs iespējams iegūt no mežizstrādes atliekām. Primāro energoresursu gala patēriņu veidos piegāde rūpniecības, pakalpojumu, transporta un mājsaimniecības sektoriem. Latvijas Republikā 1995. gadā patērēti 44.36 TWh, bet, valstij attīstoties, uz 2006. gadu gala patēriņš, pēc “Eurostat” datiem, sasniedza 48.86 TWh (Eurostat, 2010). Neskatoties uz AER izmantošanas pieaugošo tendenci, celmu ieguves potenciāls ir pētīts galvenokārt Ziemeļvalstīs, bet Baltijas valstīs un citās valstīs ar lielu celmu biomasas ražošanas potenciālu resursu un ražošanas tehnoloģiju izpēte veikta fragmentāri, galvenokārt koncentrējoties uz ietekmes uz vidi jautājumiem. Nepietiekoši pētīta ir celmu ražošanas energoefektivitāte, t.i. enerģijas daudzums, kas jāpatērē, lai šo maz apgūto izejmateriālu varētu izmantot enerģijas ieguvei. Pakalpojuma potenciālajiem sniedzējiem, mežizstrādātājiem, kā arī politikas veidotājiem un nevalstiskajām organizācijām, kas iesaistījušās dažādās biokurināmā ilgtspējas sertificēšanas shēmās, ir nepieciešams apzināt iekārtu specifiskos parametrus un izstrādes tehnoloģiju raksturojumu, lai veiktu resursa ieguvei maksimāli efektīvi un sniegtu visiem interesentiem objektīvu informāciju par dažādiem celmu biokurināmā ieguves aspektiem. Izstrādājot pētniecības darbu, par problemātiskajiem ražošanas energoefektivitātes jautājumiem iegūta objektīva informācija.

2011. gadā pētījuma ietvaros izstrādāts celmu raušanas-plēšanas kauss MCR-500, ar kura palīdzību vienlaikus var veikt celmu raušanu-plēšanu, kā arī augsnes sagatavošanu ar pacilu veidošanas vai skarificēšanas metodi, tādējādi veicinot mērķtiecīgu meža atjaunošanu stādot vai sējot. Kauss var veikt arī mikromeliorācijas pasākumus, ievelkot dziļvagas, kas novada ūdeni no pārmitrām vietām izcirtumos. Balstoties uz pētījumā iegūtajiem datiem, 2012. gadā MCR-500 veikti uzlabojumi, kuri saistīti gan ar augsnes sagatavošanas mehānismu, gan arī ar iekārtas veiktspēju pamatfunkcijas izpildē. Pētījumā, papildus iekārtas izstrādei un tās aprobācijai, sagatavots celmu raušanas-plēšanas darba metodes apraksts. Plānojot kopējo celmu izstrādes un transportēšanas tehnoloģiju atbilstoši promocijas darbā iegūtajiem rezultātiem, aprēķinātais lietderības koeficients ir pozitīvs, kas nozīmē, ka iegūtais enerģijas daudzums ir vairākkārt lielāks par kopējā izstrādes un transportēšanas procesā patērēto.

**Promocijas darba mērķis** ir izstrādāt pamatojumu tehnoloģijai, kas ļauj skuju koku izcirtumos sagatavot un nogādāt līdz nokraušanas laukumiem celmu biokurināmo ar minimālu kopējā tehnoloģiskā procesā izmantoto enerģijas daudzumu.

#### **Promocijas darba pētnieciskie uzdevumi:**

1. potenciālo celmu koksnes resursu novērtējums skuju koku izcirtumos;
2. tehnisko prasību pamatojums celmu rāvēja efektīvu darbu nodrošināšanas tehnoloģiskā mezgla konstrukcijas izveidei;
3. celmu izstrādes energobilances uzlabošanas iespēju analīze, apvienojot celmu izstrādi un augsnes sagatavošanu pirms meža atjaunošanas;
4. enerģijas patēriņu samazinošas tehnoloģijas izstrāde celmu biokurināmā sagatavošanai un pievešanai līdz nokraušanas laukumiem.

**Promocijas darbā izvirzītā tēze** – atjaunojamo koksnes energoresursu palielināšanai efektīvi izmantot celmu koksni, jo visa tehnoloģiskā procesa energobalance ir pozitīva.

Promocijas darbs izstrādāts LVMI Silava. Empīriskie dati iegūti vairāku pētījumu ietvaros, tajā skaitā:

- V. Lazdāna vadītā pētījumā “Forest energy from small dimension stands, infrastructure objects and stumps” sadarbībā ar Zviedrijas pētniecības institūtu “Skogforsk”;
- A. Lazdiņa vadītā ERAF pētījumā “Multifunkcionālas celmu izstrādes un augsnes pacilu sagatavošanas iekārtas prototipa izveidošana un testēšana” (līguma Nr. 2010/0255/2DP/2.1.1.1.0/APIA/VIAA/174);
- T. Gaitnieka vadītā pētījumā “Celmu pievešanas darba ražīgums, meža atjaunošanas gaita un vidi ietekmējošo faktoru analīze” (līguma Nr.L-KC-11\_0004).

# 1. PROBLĒMAS IZZINĀTĪBAS APSKATS

Problēmas izzinātības apskatā ietverti jautājumi, kas būtiski ietekmē celmu biokurināmā ražošanu, tajā skaitā klimata izmaiņu mazināšanas aspekti, kas ietver sevī energoefektivitātes jautājumus, celmu biomasas novērtēšanas un uzskaites metodes, kā arī celmu izstrādes tehnoloģiju raksturojums.

Pētījuma mērķis balstīts uz atziņu, ka atjaunojamo energoresursu (AER) īpatsvara palielināšana kopējā energobilancē ir viens no siltumnīcefekta gāzu (SEG) emisiju samazināšanas risinājumiem. Šī atziņa nosaka nepieciešamību palielināt tautsaimniecība aprītē jau esošo resursu izmantošanas efektivitāti un mobilizēt tos resursu veidus, kas pagaidām nav izmantoti. Viens no šādiem resursu veidiem ir celmi, kas šobrīd paliek izcirtumos, apgrūtinot meža atjaunošanu un vairojot trapes izplatīšanās risku. Celmu biomasas mobilizēšanai vispirms jāapzina šī resursu veida pieejamais daudzums un ražošanas potenciāls. Nepieciešams izvērtēt arī riskus, kas saistīti ar rūpnieciska mēroga celmu ieguvei, kā arī tehnoloģiski pieejamo celmu apjomu un celmu ieguvei nepieciešamās specializētas iekārtas, kuras paredzētas celmu rašanai-plēšanai.

## 1.1. Klimata izmaiņu samazināšana

Mūsdienās klimata pārmaiņas ir aktuāls jautājums, par ko tiek aktīvi diskutēts, ar mērķi atrast labākos risinājumus, kā samazināt SEG emisijas. Latvija klimata politikas ietvaros ir apņēmusies ievērot starptautiskās prasības, parakstot dokumentu "ANO Vispārējo konvenciju par klimata pārmaiņām" un to ratificējot Latvijas Republikas Saeimā 1995. gadā. Likuma izpildes saistības sāka koordinēt Vides aizsardzības un reģionālās attīstības ministrija atbilstoši Kioto protokolam, kuru Latvijas Republikas parakstīja 1998. gadā un Saeima ratificēja 2002. gadā. Latvijas apņemšanās sniegt ieguldījumu klimata izmaiņu mazināšanā demonstrēta, arī ratificējot Parīzes vienošanos, kas nosaka klimata neitralitāti pēc 2050. gada, tajā skaitā meža sektoram atvēlēta būtiska loma fosilo materiālu un kurināmā aizstāšanai, vienlaicīgi palielinot arī oglekļa dioksīda (CO<sub>2</sub>) piesaisti dzīvajā biomasā, augsnē un citās oglekļa krātuvēs, lai daļēji kompensētu lauksaimniecības un citu sektoru radītās SEG emisijas.

Latvija ir to 164 valstu sarakstā, kuras ir apņēmušās īstenot dažādus SEG emisijas samazinošus politiskas virzienus. Kopējais izstrādātais virzienu skaits ir 9, no kuriem tieši ar meža nozari saistāmi 3: palielināt atjaunojamo energoresursu īpatsvaru energoresursu bilancē, palielināt energoresursu efektīvu un racionālu izmantošanu, palielināt CO<sub>2</sub> piesaisti mežsaimniecībā (LR Vides un reģionālās..., 2006). Kopējais mērķis šai Konvencijai un jebkuram ar to saistītam juridiskam dokumentam ir saskaņā ar attiecīgajiem Konvencijas nosacījumiem sasniegt siltumnīcefekta gāzu koncentrācijas stabilizāciju atmosfērā tādā līmenī, kas novērstu bīstamu antropogēnu iejaukšanos klimata sistēmā (LR Vides un reģionālās..., 2006). Par atskaites punktu tiek pieņemts 1990. gada emisiju līmenis. Šobrīd Latvijā vēl darbojas Vides politikas pamatnostādnes 2014.–2020. gadam, bet turpmāk Oglekļa mazietilpīgas attīstības stratēģijā 2050 ietilpst "Latvijas nacionālais enerģētikas un klimata plāns 2021-2030"; pamatnostādnes tiek paredzētas arī nākamajiem plānošanās periodiem līdz 2050. gadam. Papildus izstrādāta Latvijas pielāgošanās klimata pārmaiņām, stratēģija 2030.

Analizējot pasaules pieredzi, konstatēts, ka CO<sub>2</sub> piesaiste mežos un koksnes produktos minēta kā galvenais instruments klimata neitralitātes mērķu sasniegšanai, uzsverot mežu izšķirošo lomu klimata pārmaiņu mazināšanas politikas kontekstā. Lielbritānijā veikts pētījums apliecina, ka meža apsaimniekošanai ir būtiska ietekme uz siltumnīcefekta gāzu bilanci, tajā skaitā oglekļa un CO<sub>2</sub> apriti meža zemēs. Uzsverot, ka augošs mežs piesaista CO<sub>2</sub>, bet oglekļa atgriešanās atmosfērā notiek koksnes produktu izmantošanas laikā, atzīmējot ar augsni saistīto CO<sub>2</sub> emisiju neskaidro statusu un nepieciešamību analizēt oglekļa uzkrājumu svārstības mežizstrādes ietekmē atkarībā no augsnes tipa (Morison et al., 2012). Kanādā Lundmarks publicējis pētījumu par priežu un egļu mežaudžu rotācijas perioda saistību ar oglekļa uzkrāšanas

funkciju un ekonomiskiem ieguvumiem mežizstrādē, secinot, ka, pagarinot priežu un egļu audžu rotācijas periodu par vairāk nekā 20 gadiem, mežaudzes kopējais CO<sub>2</sub> uzkrājums sāk samazināties, turklāt tas notiek uz audzes krājas samazināšanās rēķina (Lundmark et al., 2018). Līdzīgas atziņas ir arī Latvijā (Lazdiņš, 2015).

Zviedrijā veiktā pētījumā, saistībā ar CO<sub>2</sub> līmeņa samazināšanu atmosfērā mežizstrādes intensifikācijas rezultātā valsts ziemeļu un centrālajā daļā, norādīts, ka ar intensīvu mežizstrādi iespējams palielināt oglekļa uzkrāšanas dzīvajā biomasā, augsnē un koksnes produktos. Tomēr uzsvērts, ka oglekļa uzkrāšanās palielinājums var nebūt lineārs, iespējamās periodiskas svārstības saistībā ar mežizstrādes dinamiku konkrētos gados, ņemot vērā arī meža mašīnu radītos CO<sub>2</sub> izmešus. Kopumā 100 gadu periodā tomēr uzrādīta pieaugoša oglekļa uzkrāšanās meža zemēs intensīvas apsaimniekošanas apstākļos (Poudel et al., 2012). Cits pētījums, kas veikts Somijā, sniedz pretrunīgus, grūti interpretējamus rezultātus, norādot, ka zemas intensitātes mežizstrāde veicinās oglekļa labāku uzkrāšanos mežā 90 gadu periodā, tomēr ļoti ilgā termiņā oglekļa piesaiste mežaudzē pieaugs, īstenojot tādus mežizstrādes scenārijus, kuri vērsti uz krājas pieauguma optimizāciju, labvēlīgu cīršanas apjomu uzturēšanu. (Heinonen et al., 2017). Pētījumā autors norāda, ka ir pietiekami intensīvu mežizstrādi atjaunošanas cirtē veikt agrīni, ne vēlāk kā tad, kad mežaudzes ikgadējais pieaugums kļūst vienāds ar vidējo pieaugumu.

2011. gadā Zviedrijā veikts pētījums par tiešo mežizstrādes darbu mašīnu radītajām CO<sub>2</sub> emisijām, salīdzinot dažādus scenārijus, kur secināts, ka krājas kopšanā harvesteru un forvardera lietošanas gadījumā būs mazākas izmaksas un CO<sub>2</sub> emisijas, nekā lietojot vienu meža mašīnu – harvarderu, ar nosacījumu, ka neatšķiras meža mašīnu operatoru prasmes un iemaņas, kas ir būtiskas gan izmaksās, gan nākotnes koku saglabāšanā (Mangoyana, 2011). Citā pētījumā Zviedrijā analizēta harvesteru saražoto SEG emisiju atkarība no CTL (angl. cut to length) iestatījumiem, secinot, ka optimāla sortimenta garuma precizitātes iestatīšana, izvairoties no pārlietu lielas precizitātes, kas palēnina sagarumošanas procesu, viennozīmīgi samazinās CO<sub>2</sub> emisijas un palielinās darba ražīgumu, uzsverot gan, ka vēl lielāka ietekme uz CO<sub>2</sub> patēriņu ir stumbra un gatavojamo sortimentu caurmēra (Prinz et al., 2018).

## 1.2. Koksnes biomasu un tās izmantošanas iespējas

Par celmu biomasu uzskata koku stumbra apakšējo daļu no koku gāšanas zāģējuma vietas līdz zemes virskārtai (Broks, 2003), kā arī apakšzemes daļu, kura atrodas augsnē – skeletsaknes, sīkās saknes (ar caurmēru robežās no 2 līdz 10 mm) un uzsūcošās saknes (caurmērs mazāks nekā 2 mm). Biomasas kopējo struktūru veido tās sadalījums pa audzes komponentiem un frakcijām, pie kurām pieskaitāmi koks, stumbrs, zari, skujujas, celms un saknes. Lielākoties līdz šim ir bijis pieprasījums pēc stumbra koksnes, kuru izsaka tilpuma mērvienībās (kubikmetros), atbilstoši koksnes patēriņa pamatmērķiem. Bokurināmā ražošanā tilpuma mērvienības pakāpeniski aizstāj ar biomasu un citām mērvienībām, kas raksturo biomasas siltumspēju. Divās pēdējās desmitgadēs koksnes uzskaites principi ir būtiski mainījušies, arvien lielāku lomu piešķirot precīzai siltumspēju raksturojošo parametru fiksēšanai. Tas skaidrojams ar vairākkārt pieaugušo AER patēriņu Latvijā: 1991. gadā AER patēriņš 500 TWh, bet 2012. gadā – jau 2298 TWh, kas nozīmē palielinājumu par 22% (Būmanis, 2013).

Analizējot malkas energoresursu cenu dinamiku Latvijā kopš 2005. gada, kad cena par vienu malkas kubikmetru bija 9.57 EUR, tā salīdzināta ar 2018. gadu, kad malkas cena ir palielinājusies, sasniedzot 37.40 EUR m<sup>3</sup> (www.lvm.lv publicētā informācija, skatīts 05.08.2019). Līdzīga cenu pieauguma dinamika novērojama Zviedrijā, kur malkas cena no 20 EUR m<sup>3</sup> (211 SEK m<sup>3</sup>) 1999. gadā palielinājusies līdz 23 EUR m<sup>3</sup> 2018. gadā (International, 2019). Savukārt, salīdzinot mežizstrādes izmaksas, kurās iekļautas sagatavošanas (koku gāšana, atzarošana, sagarumošana sortimentos (AS “Latvijas valsts meži,” 2008) un pievešanas (sagatavotos sortimentus ar kokmateriālu pievešanas mašīnu pieved un nokrauj augšgala krautuvē) būtisks izmaksu pieaugums, to attiecinot uz vienu kubikmetru, nav novērojams (1.1. att.). Ražīguma rādītāji, pievedot kokmateriālus ar forvarderu, uzskaitīti no

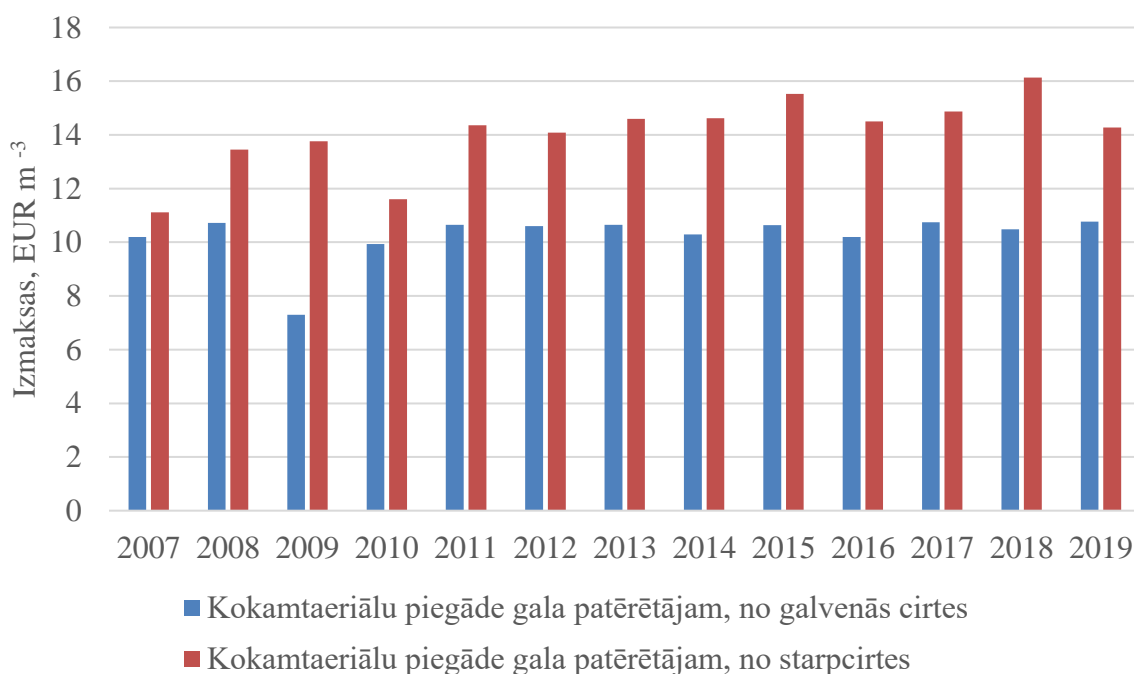
2010. gada, kad vidējais sasniegtais ražīgums no  $11.37 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , 2018. gadā sasniedza  $12.7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , norādot uz nelielu palielinājumu. Līdzīgi ražīguma rādītāji ir konstatēti Zviedrijā (Eriksson & Lindroos, 2014). To daļēji var skaidrot ar meža mašīnu operatoru sistemātisku kvalifikācijas pieaugumu un tehnikas parka modernizēšanos. Pirmie ražīgumu raksturojošie dati no ražošanas pieejami LVM mājaslapā (publiskoti no 2009. gada), kad ražīgums, strādājot ar harvesteru galvenajā cirtē, bija no  $8.1$  līdz  $23 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . Salīdzinot ar 2019. gada janvāra datiem, redzams, ka ražīgums ir pieaudzis, jo mazākais rādītājs ir  $11.8$ , bet lielākais –  $22.1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . Šāds ražīguma pieaugums skaidrojams ar pētījumiem, kuri saistīti ar darba metožu pilnveidošanu vai jaunu ieviešanu, kā arī ar meža mašīnu operatoru apmācību. Līdzīgi ražīguma rādītāji ir arī Zviedrijā, kur pētnieki ir pamatojuši ražīguma prognozēšanai izmantojamu matemātisku sakarību (Jiroušek et al., 2007):

$$Y = 60.711x^{0.6545} \quad (1)$$

kur:

Y – ražīgums,  $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$ ;

x – vidējā koka tilpums,  $\text{m}^3$ .



Avots: autora veidots saskaņā ar CSP datiem

### 1.1. att. Ražošanas izmaksas galvenajā cirtē un starpcirtē

Malka ir vienīgais biokurināmā resursu veids, kuru izmanto, sadedzinot bez iepriekšējas pārveidošanas vai arī to vispirms pārstrādājot granulās vai briketēs. Malkas plašāks pielietojums īsti nav iespējams, kas skaidrojams ar zemām prasībām tās kvalitātei. Galvenā malkai raksturīgā koksnes vaina ir trupe, kura malkai drīkst būt līdz  $80\%$  (AS Latvijas valsts meži, 2017). Celmu koksnei ir plašākas tālākās izmantošanas iespējas nekā malkai. Viens no tautsaimniecībā svarīgiem celmu koksnes izmantošanas virzieniem ir kolofonija ieguve, kur iegūstamais apjoms no priežu celmiem līdz  $21\%$ . Ražošanas blakusproduktus var izmantot šķeldu, brikešu vai kokogļu ražošanai. Literatūrā minēts, ka celmu koksni var izmantot mēbeļu rūpniecībā, nelielu zvejas laivu būvniecībā, terpentīna iegūšanai, kā potenciālu izejvielu bioeļļas un biodīzeļdegvielas ražošanai (Berndes et al., 2016).

Mežizstrādes atliekas ir svarīgas bioenerģijas izejvielas reģionos ar aktīvu mežsaimniecību, bet vāji attīstītu kokrūpniecību. Pārvietojot mežizstrādes atliekas no ieguves vietas, tiek samazināts oglekļa daudzums mežā salīdzinājumā ar metodi, kad tās atstāj izklaidus

vai ieklāj tehnoloģiskās brauktuves to nostiprināšanai. CO<sub>2</sub> emisijas, ko rada bioenerģijas ražošana, saistītas ar mežizstrādes atlieku sadedzināšanu, emitējot CO<sub>2</sub> atmosfērā uzreiz nevis pakāpeniski, sadaloties organiskajai vielai mežā. Kopējais emisiju apjoms, sadedzinot koksni vai to atstājot mežā, nemainās. SEG emisiju samazinājums, sadedzinot biomasu, ir vienlīdzīgs fosilā kurināmā aizstāšanas efektam.

Maza izmēra koki agrāk uzskatīti par nozīmīgāko meža šķeldu avotu. Tomēr, ieviešot mehanizētu mežizstrādes tehnoloģiju, atlikumi no galvenās izmantošanas cirtes ir kļuvuši par pievilcīgāku un būtiski lētāku enerģijas avotu. Vainags ir mežizstrādes atlieku šķeldu galvenā sastāvdaļa no galvenās cirtes. Kamēr atzarošanu veica ar motorzāģiem, mežizstrādes atliekas palika vienmērīgi izkliedētas. Atlieku savākšana pēc mežizstrādes bija dārga operācija, kas palielina augsnes piejaukumu īpatsvaru un apgrūtina koksnes smalcināšanu. Tagad, kad praktiski visas galvenās izmantošanas cirtes Ziemeļvalstīs veic mašīnizēti, gāšanas un atzarošanas operāciju var pielāgot, lai sakrātu zarus un citas ciršanas atliekas kaudzēs. Tas uzlabo sekojošās savākšanas un transportēšanas ražīgumu par aptuveni 30%, rada tīrāku šķeldu un palielina reģenerācijas procentuālo apjomu līdz 65–80%. Šķeldu ražošanas apjoms no mežizstrādes atliekām, kurās ieskaita ciršanas atliekas, celmus, mazās dimensijas kokus Somijā ir 6.9 milj. m<sup>3</sup> un Zviedrijā 8.4 milj. m<sup>3</sup> (Asikainen, 2012).

Somu zinātnieku pētījumā novērtētas emisijas, savācot ciršanas atliekas no meža Norvēģijas un Somijas boreālajos mežos. Pētījumā secināts, ka celmi noārdās lēnāk nekā zari, un tādējādi celmu enerģijas patēriņš rada līdz 2 reizes lielāku netiešās emisijas apjomu. Pēc pirmajiem 10 gadiem netiešās emisijas no zariem bija 200 kg CO<sub>2</sub> MWh<sup>-1</sup> un no celmiem 310 kg CO<sub>2</sub> MWh<sup>-1</sup>. Savukārt pēc 100 gadiem šīs emisijas no zariem 70 kg CO<sub>2</sub> MWh<sup>-1</sup> un celmiem 160 kg CO<sub>2</sub> MWh<sup>-1</sup>. (Repo et al., 2011). T. Palosuo aplēsa, ka netiešās emisijas no oglekļa krājumu samazināšanas ir ievērojami lielākas, nekā citas emisijas no enerģijas ražošanas ķēdes, izmantojot mežizstrādes atliekas. Neraugoties uz netiešo emisiju būtisko ieguldījumu kopējās emisijās par vienu saražotās enerģijas vienību, T. Palosuo aprēķinātais emisiju ekvivalents ir aptuveni 50 kg CO<sub>2</sub> MWh<sup>-1</sup>, kas ir par 80–90% mazāk, nekā emisijas no dažādiem fosilajiem kurināmajiem (Palosuo et al., 2001). Biomasas apjoma noteikšanas iespējas

Koksnes biomasas apjoma noteikšanai ir dažādas metodes, kuras dod rezultātu masas (tonnas sausas) izteiksmē. Sausna ir nemainīga biomasas mērvienība, ko var transformēt enerģijas un tūluma mērvienībās. Koksnes biomasas prognozēšana valsts un reģionālā mērogā nepieciešama, piemēram, saistībā ar Kioto protokola darbībām, kurās biomasu ir nozīmīgākais rādītājs oglekļa uzkrājuma aprēķiniem (Lincoln, 2005). Biomasas noteikšanai visvienkāršākā metode ir to izteikt procentos no kopējās koksnes krājas, izmantojot vienkāršus biomasas pārrēķinu faktorus. Atsevišķos gadījumos autors neizdala atsevišķi celmu koksnes iegūstamo biomasu sadalījumā pa koku sugām. Piemēram, pētnieks Sjuņevs (Сюнев, 2014) norāda celmu biomasas apjomu 10-20% robežās. Līdzīgu informāciju atspoguļo arī Latvijā publicētā informācija, kurā minēts, ka celmu un lielo sakņu krāja veido līdz 20% (Lazdiņa, 2008). Biomasas apjoma precīzākiem aprēķiniem izmanto koku dimensiju, sugu un augšanas apstākļu determinētus algoritmus, un šādi modeļi saimnieciski nozīmīgākajām koku sugām ir izstrādāti arī Latvijas apstākļiem.

I. Liepa 2008. gada publikācijā apraksta koeficientus parastajai eglei (Liepa & Blija, 2008). Savukārt A. Bārdulis savā publikācijā apraksta regresijas vienādojumu parastajai priedei, kura aug lauksaimniecības zemēs (Bārdulis at al., 2012). Līdz šim plašākais Latvijā veiktais pētījums, kurā izstrādāti koeficienti vairākām koku sugām – eglei, priedei, bērzam un apsei – ir J. Liepiņa publikācijās (Liepiņš et al., 2017; Liepiņš et al., 2016). Līdzīgus pētījumus veic teju katrā valstī, lai izveidotu maksimāli precīzus un vietējiem apstākļiem pielāgotus vienādojumus un sasniegtu mērķi precīzāk aprēķināt un tālākā procesā prognozēt biomasas apjomus, kā arī precīzāk novērtēt SEG emisijas un CO<sub>2</sub> piesaisti. Kamēr nebija pieejami J. Liepiņa izstrādātie koeficienti, Latvijā izmantoti Zviedrijā un Somijā izstrādātie vienādojumi, kuru autori ir Marklund (Marklund, 1988), Petersson (Jalkanen et al., 2005) un Repola (Repola, 2006, 2008).



### 1.3. Celmu ieguves paņēmieni

Veicot atjaunošanas cirti (galveno cirti), tiek novākta “raža” – stumbra koksne, kā arī zari un galotne. Izcirtumā pēc koku gāšanas un pievešanas paliek koka sastāvdaļa – celms, kas daļēji atrodas virs zemes un daļēji – augsnē.

Pēc izstrādes paliekošie celmi var apgrūtināt meža atjaunošanu, jo atsevišķos gadījumos celmu virszemes augstums var sasniegt līdz 1 m (Sarmulis & Saveljevs, 2015). Šīs problēmas risināšana zināma jau izsenis, jo paralēli celmu ieguvei mežsaimnieki domā arī par augsnes sagatavošanu. Kopumā celmu raušana ir iespējama četros variantos:

- vesela celma raušana ar pamatsaknēm;
- celma daļu raušana ar dažām pamatsaknēm;
- celmu virszemes daļas nogriešana bez saknēm;
- celma sasmalcināšana uz vietas (Sarmulis & Saveljevs, 2015).

Vesela celma raušana ar pamatsaknēm ir zināma jau izsenis, kur būtisku ieguldījumu jautājuma risināšanā paveica A. Grīnfelds, 1971. gadā aizstāvot savu disertāciju “Pētījumi par priedes gāšanu ar saknēm Latvijas PSR apstākļos”. Šajā disertācijā izstrādāta “Koku gāšanas tehnoloģisko paņēmieni klasifikācijas shēma” (Grīnfelds, 1971). Celmu ieguve paredzēta ar atbilstošas jaudas traktoru. Taču pastāv arī primitīvāki veidi veselu celmu sagatavošanai, kur nepieciešamie instrumenti ir lāpsta, cirvis, vinča un trijkāju balsts vai dinamīts (Sarmulis & Saveljevs, 2015). Šobrīd Latvijā celmu raušanu veic projektēto jaunu ceļa posmu izbūvē, kuros paliekošos celmus izstumj ar attiecīgas jaudas buldozeriem vai izplēš ar ekskavatoriem.

Celmu daļas raušana ar dažām pamatsaknēm būtiski neatšķiras no vesela celma raušanas. Lielākā atšķirība ir tāda, ka šī darba veikšanai tiek izmantota ekskavatoru tehnika. Analizējot līdz šim paveikto, lielākoties celmu raušana veikta Skandināvijas valstīs, kurās kā svarīgākie rādītāji publikācijās un pārskatos atspoguļoti izrauto celmu skaits stundā, ražīgums, to izsakot  $t_{\text{sausnas}} \text{ h}^{-1}$  ( $\text{DM h}^{-1}$ ). Šobrīd celmu raušanas iekārtas tiek uzstādītas uz ekskavatoriem, un tas ir saistīts ar tehnikas noslodzi: proti, aktīva ekskavatoru izmantošana ir būvniecības laikā, savukārt pēc tam tehnika netiek noslogota un to ir iespējams izmantot celmu raušanas procesā. Līdz šim apkopotajos pētījumos par celmu raušanas iekārtām ārvalstīs, ja analizē pēc izrauto celmu skaita produktīvajā stundā, ražība ir robežās no 36 līdz 153 celmiem stundā. Par līdz šim efektīvāko ārvalstīs var uzskatīt Järvinen iekārtu, ar kuru strādājot vidēji iespējams izraut  $107 \text{ gab. h}^{-1}$  (1.1. tabula). Savukārt, ja salīdzina ražīguma rādītājus, izteiktus  $t_{\text{sausnas}}$ , tie ir robežās no 1.6 līdz 7.2  $t_{\text{sausnas}}$ , kur par produktīvāko var uzskatīt Aalto –  $5.3 t_{\text{sausnas}} \text{ h}^{-1}$ .

1.1. tabula. Celmu raušanas – plēšanas iekārtu salīdzinājums

Iekārtas marka	Iekārtas masa, kg	Ražīgums, produktīvajā stundā, $t_{\text{sausnas}}$	Min un maks. ražīgums, produktīvajā stundā, $t_{\text{sausnas}}$	Celmu skaits, produktīvajā stundā, gab.	Celmu min – maks. skaits stundā, gab.
Aalto	800	5.3	2.5-7.2	75	44-139
Biorex 30	1500	3.4	3.2 - 3.7	46	41 - 52
CBI	2100	4.4	4.2 - 6.0	54	49 - 65

Iekārtas marka	Iekārtas masa, kg	Ražīgums, produktīvajā stundā, t <sub>sausnas</sub>	Min un maks. ražīgums, produktīvajā stundā, t <sub>sausnas</sub>	Celmu skaits, produktīvajā stundā, gab.	Celmu min – maks. skaits stundā, gab.
Rotary stump cutter	1000	2.2	1.6 - 3.0	67	36 - 107
Pallari 140	2000	4.4	4.0 - 6.1	85	54 - 153
Pallari 160	2200	4.8	4.6 - 5.1	58	48 - 72
CeDe 2600	2900	6.0	5.4 - 6.7	63	60 - 66
Herkules	1500	3.4	2.3 - 4.2	46	30 - 60
X-power	2500	5.1	4.8 - 5.2	75	73 - 76
Väkevä	-	3.5	3.5 - 3.6	79	78 - 80
Järvinen	-	4.4	4.8 - 5.0	107	102 - 122

Avots: (Berg, Bergström, & Nordfjell, 2015; Björheden, 2010; Kärhä, 2012)

Celmu virszemes daļas nogriešana meža nozarē vairāk pazīstama kā celma augstuma samazināšana uz tehnoloģiskajām brauktuvēm, pievešanas vai treilēšanas darbu veikšanai. Teorētiski celmu virszemes daļu var nogriezt mehānizēti ar rokas motorzāģi vai mašīnizēti ar papildus mehānismu, kurš uzstādīts uz greifera satvērēja (Sarmulis & Saveljevs, 2015).

Ceturtais no apskatāmajiem variantiem paredz celma smalcināšanu. Šādu praksi lielākoties pielieto parku ierīkošanā un uzturēšanā. Latvijā 2015. gadā veiktajā pētījumā, lai prognozētu celmu frēzēšanai patērējamo laiku, izstrādāts vienādojums:

$$D_{1,3} = 0.7 + 0.74 \times D_0 \quad (2)$$

kur:

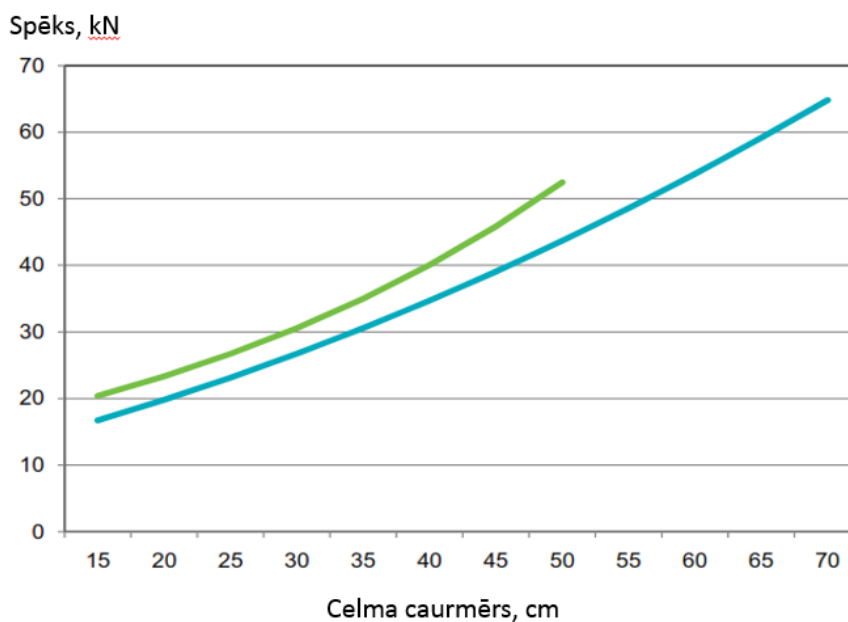
$D_{1,3}$  – caurmērs 1.3 m no sakņu kakla;

$D_0$  – celma caurmērs (Straupe, 2015).

Savukārt Somijā izgatavots celmu urbis, ar kura palīdzību iespējams izurbt celma vidusdaļu, atstājot saknes augsnē. Lai varētu izmantot celma vidusdaļu tālākai pārstrādei, Zviedrijā izveidota iekārta, kuras pamatā ir metāla caurule, kurai apakšējā daļā izveidoti zāģim līdzīgi zobi: veicot iekārtas apļveida rotāciju, tiek izgriezta celma vidusdaļa. Izmantojot šādu iekārtu, būtiski uzlabojas biokurināmā kvalitāte un tiek nodarīti minimāli bojājumi augsnei, tomēr lielākā daļa biomasas paliek augsnē un var samazināties pievešanas ražīgums, jo celmi jāpārcilā pa vienam. Aprēķināts, ka šādā veidā var samazināt spēku, kas nepieciešams celma izgriešanai un izraušanai (Hofsten, 2008).

Līdzšinējie pētījumi apstiprina, ka celmu izmantošanā bioenerģijai ir saskatāms krietni lielāks potenciāls, salīdzinājumā ar mežizstrādes atliekām. Lielāks raušanas spēks ir vajadzīgs tieši parastās egles un bērza celmiem morēnās (augšnes pārsvarā podzolētas, tās veidojušās uz irdenām un vāji mālainām smiltīm, kā arī morēnu nogulumiem), izteiktāk tieši slapjās augsnēs, mazāk izteikti sausās augsnēs. Ja celms pirms raušanas tiek sašķelts, tad tā izraušanai ir nepieciešams pielietot mazāku spēku. Ja celmu sašķeļ pirms raušanas, tad tirgū pieejamie lielākie forvarderi ir pietiekami spēcīgi, lai spētu izraut celmus, kas diametrā nepārsniedz 35 cm. Šādu celmu kopējā masa ir aptuveni 2 tonnas. Samazinot masu līdz vienai tonnai, tas pats forvarders ir spējīgs izraut celmu diametrā līdz 45 cm, (masas samazināšana panākama ar celma sašķelšanu pirms raušanas). “Raušanas likums” – spēku, kas nepieciešams, lai izrautu 20 cm resnu celmu, kura masa ir 2 tonnas, ir nepieciešams palielināt par apmēram 1 masas tonnai atbilstošu spēku, ja celma diametrs palielinās par 10 cm. Šis likums ir spēkā, ja celms

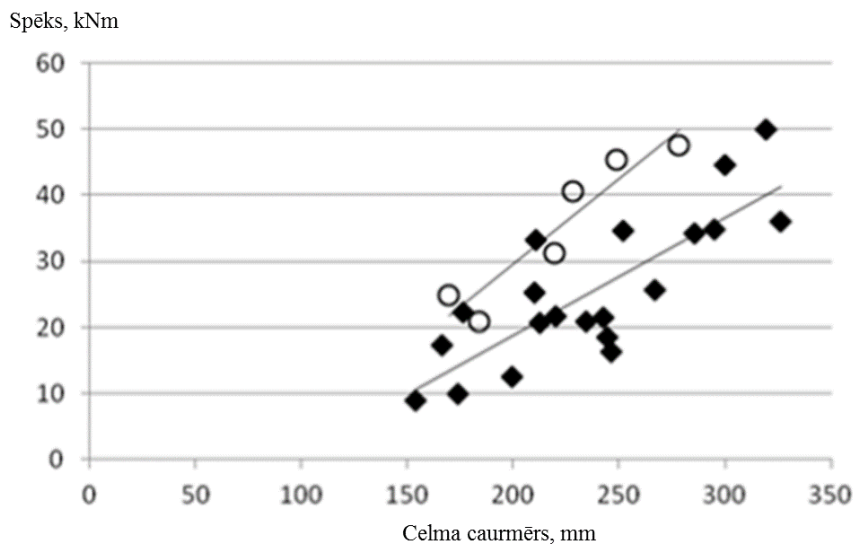
pirms raušanas tiek sašķelts. Grafiski iepriekš minētais likums attēlots 1.2. att. Celmu raušanas vietā ir iespējams vērpsšanas paņēmiens. Vērpsšanas paņēmiens nodrošina tieši masīvākās celma daļas iegūšanu. Šā paņēmiens rezultātā netiek iegūtas sānsaknes, jo tās tiek norautas vai nogrieztas.



Avots: autora veidots

### 1.2. att. Raušanas spēka (kN) un celmu diametra (cm) saistība

1.2. att. parādīts maksimālais nepieciešamais raušanas spēks priedes un bērza celmiem attiecībā pret celma caurmēru. Zaļā līnija attēlo nepieciešamo spēku gadījumā, kad celms rauts vesels, bet zilā līnija attēlo nepieciešamo maksimālo spēku, ja celms pirms raušanas ir sašķelts. Šāda spēka/diametra attiecība ir spēkā morēnās augsnēs 97.5% gadījumu (Björheden, 2010). Alternatīvi risinājumi celmu raušanai ir to vērpsana. Celmu vērpsana pašreiz atrodas tikai izpētes stadijā. Tā ir viena no nākotnes metodēm celmu ieguves jomā. Galvenais šīs metodes mērķis ir samazināt ietekmi uz vidi. Tieši izmantojot tikai celmu centrālo daļu, iespējams samazināt celmu izstrādes ietekmi uz augsni. Galvenais šīs sistēmas mīnuss ir mazāks iegūtās biomasas īpatsvars, kas samazina summāro procesa energoefektivitāti. Pētījumi par nepieciešamo vērpsšanas spēku jau aizsākti 1989. gadā, kad tika pētīts bīdes spēks, kuru iztur celms, bet šie pētījumi neatspoguļo griezes momenta mērījumus, kas jāattīsta, lai atbrīvotu celma centrālo daļu no saknēm. Protams, metode, kas attēlota 1.3. att., tāpat rada ietekmi uz augsni, jo šajā gadījumā tik un tā dažas no saknēm nenotrūkst un rada zemsegas bojājumus, tāpēc šo metodi ieteicams papildināt ar nazi (nažiem), kas atgriež saknes tieši vērpsšanas laikā. Simons Bergs ar kolēģiem savā pētījumā par griezes spēku, kas nepieciešams, lai vērptu celmus un apgrieztu to saknes, novērtējis jaunāko tehnoloģiju iespējas Zviedrijā. Pētījuma ietvaros vērpti 28 parastās priedes celmi, ievērojot dažādas celma vecuma pakāpes. Tāpat celmi ir izvēlēti attiecīgi dažādām diametra grupām (Berg et al., 2012).



Avots: (Berg et al., 2012)

### 1.3. att. Griezesauguma un diametra krūšu augstumā sakarība

Lai celmu savērtu līdz atbrīvotai pozīcijai, nepieciešams būtiski lielāks griezes moments nekā gadījumā, ja metode ir papildināta ar griezējažiem, kas atgriež saknes celma vērpšanas laikā (Berg et al., 2012).

## 2. PĒTĪJUMA MATERIĀLS UN METODIKA

Promocijas darba struktūra veidota izvirzītā mērķa sasniegšanai, atbilstoši 4 pētnieciskajiem uzdevumiem. Kopējais izvirzīto uzdevumu ietvars paredz pieejamo resursu novērtējumu, kā arī kopējo celmu ieguves un transportēšanas tehnoloģijas novērtējumu.

Pirmā uzdevuma risināšanai potenciālā un tehnoloģiski pieejamā celmu koksnes apjoma notikšana balstīta uz Meža statistiskās inventarizācijas (MSI) datiem, pēc kuriem aprēķināta celmu biomasa, pielietojot J. Jiepiņa izstrādātos vienādojumus.

Otrā uzdevuma izpilde saistīta ar celmu raušanas-plēšanas konstrukcijas, darba metožu un tehnisko prasību izveidi un aprobāciju. Celmu raušanas-plēšanas iekārtas specifikācijas projektēšanas uzdevumā balstītas uz teorētiskās mehānikas aprēķiniem, bet aprobācija – uz mērījumiem lauka izmēģinājumos. Pirms celmu raušanas būtiski visus celmus marķēt, savukārt pašu raušanas-plēšanas procesu nodrošināt atbilstoši plānotajām darba metodēm. Iekārtas vai tehnoloģiskā mezgla uzlabojumi atspoguļojas kā ražīguma izmaiņas sadalījumā pa darba elementiem, kur rādītāju salīdzināšanai pielieto aprakstošo un secinošo statistiku.

Trešā uzdevuma (celmu izstrādes energobilances uzlabošanas iespēju analīze, apvienojot celmu izstrādi un augsnes sagatavošanu pirms meža atjaunošanas) izpildei nepieciešamas atbilstošas cirsmas, kurās var salīdzināt dažādus augsnes gatavošanas paņēmienus. Vērtēšanas kritēriji ir sagatavotais stādvieta skaits un kvalitāte, ražīgums un patērētā degviela. Datu kopu salīdzināšanai pielieto aprakstošo statistiku.

Ceturtnā uzdevuma izpilde balstīta uz kopējo celmu izstrādes un transportēšanas tehnoloģiju, kurā kā rezultējošie rādītāji ir ražīgums (sadalījumā pa darba elementiem) un fosilo energoresursu patēriņš ražošanas procesā. Datu analīzei pielietota aprakstošā un secinošā statistika.

Izstrādātajā metodikā strukturizēti izklāstīta cirsmu atlase, datu ievākšana un to apstrāde. Pētāmā materiāla un metodikas nodaļa izstrādāta, balstoties uz izvirzītajiem uzdevumiem, kur nodaļu numerācija tieši atspoguļo konkrētā darba uzdevuma risināšanu.

**Datu ievākšana** – izmēģinājumiem izraudzītas platības, kurās atjaunošanas cirte veikta 3 gadus pirms plānotās celmu izstrādes, bet kā papildus kritēriji objektu atlasei ir sugu sastāvs un meža tipam – valdošā suga egļu (vismaz 70%), damakšņa, vēra vai šaurlapju bāreņa meža tipa atbilstošas audzes. Tālākais datu ievākšanas process saistīts ar lauku darbiem, kuros darba laika uzskaitē un citi būtiski rādītāji uzskaitīti atsevišķi sadalījumā pa darba operācijām. Kopējā drupinātās koksnes izstrādes tehnoloģiskajā procesā izdalītas 5 atsevišķi darbu veidi:

- celmu raušana-plēšana,
- celmu pievešana uz augšgala krautuvi,
- celmu koksnes izvešana uz starpkrautuvi,
- celmu drupināšana,
- drupinātās koksnes izvešana pie patērētāja.

Visiem darbu veidiem veikta patērētāja laika uzskaitē sadalījumā pa darba elementiem. Papildus darba laika uzskaitē monitorēta arī patērētā degviela.

Audzis atlasītas, balstoties uz LVM un SIA “Rīgas meži” ražošanas datiem par izstrādātajām cirmām. Pētījumam nepieciešamo audžu atlase balstīta uz sekojošiem kritērijiem:

- galvenās cirtes izstrāde veikta 3 gadus pirms plānotās celmu izstrādes;
- meža tips atbilstošs celmu izstrādei damakšnis (*Hylocomiosa*), vēris (*Oxalidoso*);
- pievešanas attālums līdz 100 m, pievešanas apstākļi labi vai vidēji (AS “Latvijas valsts meži,” 2015);
- audzes sastāva formulā pirms galvenās cirtes veikšanas ir ≤ 5E vai 5P.

**Datu apstrāde** atbilstoši 4 izvirzītajiem uzdevumiem.

1. Celmu biomasa aprēķini balstīti uz MSI 3. cikla datiem. Datu apstrādē atlasītas platības atbilstoši marķējumam – meža zemes (10. kods), papildus atlasīti meža tipi, kuros celmu raušana ir pieļaujama. Papildus kritērijs ir audzes vecums atbilstoši MK Nr.935

“Noteikumi par koku ciršanu mežā”. Potenciālais celmu biomasas apjoms aprēķināts, balstoties uz J. Liepiņa izstrādāto vienādojumu, kurā iegūstamā sakņu biomasu aprēķināta, pamatojoties uz individuālo koku uzmērījumiem un ekstrapolējot iegūtos datus parauglaukuma līmeni.

2. Balstoties uz iegūtajiem ražīguma rādītājiem, strādājot ar CBI, papildus ievērtētas mežsaimnieciskās vajadzības saistībā ar augsnes vienlaicīgu sagatavošanu reizē ar celmu raušanu. Izstrādātas tehniskās prasības celmu rāvēja-plēsēja prototipa izgatavošanai, balstoties uz teorētiskās mehānikas aprēķiniem un līdzšinējo pieredzi meža darbos. Pēc prototipa izgatavošanas veikta lauku darbu hronometrāža un iegūto rezultātu analīze, ar mērķi pilnveidot izgatavoto mehānismu. Datu salīdzināšanai ar līdzīgu autoru darbiem biomasu aprēķināta arī pēc Marklunda un Repola vienādojumiem. Balstoties uz iegūtajiem rezultātiem, izgatavots uzlabots prototips un iesniegti 2 Latvijas patenta pieteikumi – celmu rāvējam-plēsējam un augsnes gatavošanas iekārtai.
3. Energoatēriņa samazināšanas tehnoloģijas izstrāde balstīta uz pētījumā iegūtiem ražīguma rādītājiem visā izstrādes procesā. Ieguldāmo energoresursu aprēķinā izmantoti Loflera izstrādāti vienādojumi.

Promocijas darba rezultāti iegūti, iekļaujot datus no iepriekš veiktajiem pētījumiem saistībā ar celmu raušanu-plēšanu un augsnes mehanizētu gatavošanu, veidojot pacilas. Pirmie veiktie pētījumi saistīti ar tā laika darba mehanizācijas iespējām un pieejamo tehnisko aprīkojumu Latvijā.

2006. gadā uzsākts pētījums par koksnes biokurināmā iegūšanu no celmu koksnes (Lazdāns et al., 2008). Projekts realizēts Jelgavas novada Garozas iecirknī, 601. kvartāla apgabala 177. kvartāla 1. un 5. nogabalā. Atcelmošana veikta 3 gadus pēc galvenās cirtes. Ekskavators pārvietojies pa pievešanas ceļiem, veicot celmu raušanu visā platībā. Izmēģinājumos izmantots vidēja izmēra celmiem paredzēts CBI celmu raušanas-plēšanas kauss (2.1. att.), kas montēts uz New Holland ekskavatora.



Avots: A. Lazdiņa foto.

### 2.1. att. CBI vidēja izmēra celmu raušanas kauss

2010. gada beigās – 2011. gada sākumā veikta celmu raušanas kausa tehniskās specifikācijas izstrāde un prototipa izgatavošana. Ar jauno kausu MCR 500 (2.2. att.) laika posmā no 2010. līdz 2013. gadam veikti izmēģinājumi 3 meža nogabalos SIA “Rīgas meži” Daugavas mežniecībā. Kopējā atcelmotā platība pētījuma ietvaros ir 8 ha, tostarp 3.7 ha veikta

augšnes sagatavošana ar celmu rāvēju MCR 500, un 4.3 ha augsne sagatavota ar aktīvo disku frēzi, lai salīdzinātu augsnes sagatavošanas kvalitāti un izmaksas (2.1.tabula.).

2.1. tabula. **Izmēģinājumu objektu raksturojums SIA “Rīgas meži” platībās**

Kadastra numurs	Platība, ha	Saimniecība	Valdošā koku suga	Meža tips	Audzes formula
74940140005	2.7	Rīgas pilsētas meža fonds	Priede	Dms	7P3E
74940060231	3.8		Egle	Dm	6E2P2B + A, Ma
74940060231	1.5		Egle	As	7E2P1B + A, Ma

Avots: autora veidots

No 2011. līdz 2015. gadam celmu raušana turpināta LVM Rietumvidzemes, Ziemeļkurzemes, Zemgales un Vidusdaugavas reģionos, kur kopumā ierīkoti 6 pētījumu objekti (2.2. tabula). Arī šajos izmēģinājumos izmantots MCR 500 celmu raušanas – plēšanas kauss.

2.2. tabula. **Izmēģinājuma objekti LVM platībās**

Objekta identifikācija	Platība, ha	Saimniecība	Valdošā koku suga	Meža tips	Audzes formula
65-03-07-410-58-34	1.7	R-Vidzeme	E	Dm	8E103 1B83 1P83
82-04-07-714-188-9	2.0	Z-Kurzeme	E	Vr	-
82-05-07-712-437-8	3.4	Z-Kurzeme	E	Dm	6E4P97
83-05-07-603-326-8	1.7	Zemgale	E	Vr	6E3B1P87
83-05-07-603-326-7	1.4	Zemgale	B	Vr	5B4E1P87
80-29-07-501-360-9	3.0	Vidusdaugava	E	Dm	6E3P1B98

Avots: autora veidots



Avots: V. Lazdāna foto.

2.2. att. **MCR 500 celmu raušanas-plēšanas kauss**



## 2.1. Celmu koksnes resursu novērtējuma metodika

Aprēķini veikti, izmantojot MSI, atbilstoši iepriekš izstrādātajai metodei celmu biokurināmā novērtēšanai audzes līmenī (Lazdiņš et al., 2014) parastajai priedei (*Pinus sylvestris L.*), parastajai eglei (*Picea abies (L.) H. Karst*), bērzam (*Betula pendula Roth*) un apsei (*Populus tremula L.*). Celmu biomasas aprēķināšanai sākotnēji identificētas mežaudzes pēc vecuma - valdošās sugas koku vecums ir vienāds vai lielāks par Meža likuma 9. pantā definētajām robežvērtībām galvenās izmantošanas cirtei (LR Ministru kabinets, 2010). Papildus atlases kritēriji saistīti ar meža zemju ilgtspējīgu izmantošanu – nenoplicināšanu, proti, celmu ieguve iespējama auglīgās augsnēs, kas atbilst mētrāja (*Vacciniosa*), lāna (*Myrtillosa*), damakšņa (*Hylocomiosa*), vēra (*Oxalidososa*), gāršas (*Aegopodiosa*), slapjā damakšņa (*Myrtilloso-sphagnosa*), slapjā vēra (*Myrtilloso-polytrichosa*), slapjās gāršas (*Dryopteriosa*), mētru āreņa (*Vacciniosa mel.*), šaurlapju āreņa (*Myrtillosa mel.*), platlapju āreņa (*Mercurialiosa mel.*), mētru kūdreņa (*Vacciniosa turf. mel.*), šaurlapju kūdreņa (*Myrtillosa turf. mel.*) un platlapju kūdreņa (*Oxalidososa turf. mel.*) tipiem (Lazdiņš et al., 2014). Papildus no datu atlases izslēgtas platības ar galvenās cirtes ierobežojumiem – aizliegta mežsaimnieciskā darbība: galvenā cirte, kopšanas cirte un kailecirte. Celmu resursu novērtēšanai, balstoties uz MSI datiem, biomasa aprēķini veikti, izmantojot J. Liepiņa izstrādātos vienādojumus, ekstrapolējot atsevišķu koku pazemes biomasu uz parauglaukuma līmeni.

$$y = a * x^b \quad (3)$$

kur:

y – iegūstamā sakņu biomasa, t<sub>sausnas</sub>;

a, b – koeficienti (2.3. 2.3. tabula.);

x – koksnes krāja, m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

2.3. tabula. **Parametru vērtības**

Parametrs	P	E	B	A
a	0.231	0.296	0.215	0.143
b	0.898	0.881	0.937	0.952
Rmse	2.66	1.72	2.51	2.97
R2	0.987	0.995	0.986	0.976

Avots: autora veidots pēc Liepiņš et al., 2017

Celmu biomasas aprēķini, ražīguma rādītāju analīzē balstīti uz Marklunda un Repola izstrādātajiem algoritmiem, kas ir saistīts ar nepieciešamību nodrošināt datu salīdzinābību ar Ziemeļvalstīs un iepriekš Latvijā veiktiem pētījumiem. Saskaņā ar celmu biomasas aprēķiniem, izmantojot līdz aprobētus vienādojumus, ir iespējams salīdzināt iegūtos rādītājus ar līdzīgos pētījumos iegūtiem datiem, kas pieejami zinātniskās publikācijās. Vienādojumos celma biomasas aprēķināšanai izmantots krūšaugstuma caurmērs (D<sub>1.3</sub>), tāpēc celmu uzmērījumu dati vispirms pārrēķināti uz caurmēru 1.3 m augstumā. Eglei, kas visos izmēģinājumu objektos ir valdošā suga, izmantots 4. vienādojums, priedei – 5. vienādojums (Marklund, 1988), bērzam – 6. vienādojums (Repola, 2008). Apsei, kurai līdz šim nav izstrādāts vienādojums aprēķinu veikšanai, izmantots valdošās sugas (egles) krūšaugstuma caurmēra aprēķina vienādojums.

$$D_{1.3} = 0.7 + 0.74 * D_0 \quad (4)$$

kur:

D<sub>1.3</sub> – caurmērs 1.3 m augstumā no sakņu kakla, cm;

D<sub>0</sub> – vidējais celma caurmērs.



$$D_{1.3} = 1.89 + 0.87 * D_0 \quad (5)$$

kur:

$D_{1.3}$  – caurmērs 1.3 m augstumā no sakņu kakla, cm;

$D_0$  – vidējais celma caurmērs.

$$D_{1.3} = -6.7 + 0.916 * D_0 \quad (6)$$

kur:

$D_{1.3}$  – caurmērs 1.3 m augstumā no sakņu kakla, cm;

$D_0$  – vidējais celma caurmērs.

Celma biomasu rēķina, izmantojot J. Liepiņa izstrādātos vienādojumus un Ziemeļvalstīs izstrādātos vienādojumus: eglei – 7. vienādojumu, priedei – 8. vienādojumu (Marklund, 1988), bērzam – 9. vienādojumu (Repola, 2006, 2008). Bērza biomasas vienādojums ietver arī lielās saknes. Pārējām sugām celma un sakņu biomasas noteikšanai izmantoti valdošās koku sugas biomasas vienādojumi.

$$M_S = \exp\left(-3.36 + 10.67 * \frac{D_{1.3}}{D_{1.3} + 17}\right) \quad (7)$$

$$M_S = \exp\left(-3.97 + 11.05 * \frac{D_{1.3}}{D_{1.3} + 15}\right) \quad (8)$$

$$M_S = \exp\left(-3.68 + 11.54 * \left(\frac{2 + 1.25 * D_{1.3}}{2 + 1.25 * D_{1.3} + 26} + 0.02 + 0.05\right)\right) \quad (9)$$

kur:

$M_S$  – celmu biomasas,  $kg_{sausnas}$ .

Egļu un priežu lielāko sakņu ( $D > 5$  cm) biomasu rēķina, izmantojot citus eksponenciālās līknes vienādojumus: eglei – 10. vienādojumu, priedei – 11. vienādojumu (Marklund, 1988).

$$M_S = \exp\left(-6.39 + 13.37 * \frac{D_{1.3}}{D_{1.3} + 8}\right) \quad (10)$$

$$M_S = \exp\left(-6.34 + 13.29 * \frac{D_{1.3}}{D_{1.3} + 9}\right) \quad (11)$$

kur:

$M_S$  – celmu biomasas,  $kg_{sausnas}$ .

Mazāko sakņu ( $D < 5$  cm) biomasu rēķina atsevišķi, izmantojot eksponenciālās līknes vienādojumu: eglei – 12. vienādojumu, priedei – 13. vienādojumu (Marklund, 1988).

$$M_S = \exp\left(-2.57 + 7.63 * \frac{D_{1.3}}{D_{1.3} + 12}\right) \quad (12)$$

$$M_S = \exp\left(-3.84 + 8.88 * \frac{D_{1.3}}{D_{1.3} + 10}\right) \quad (13)$$

kur:

$M_S$  – celmu biomasas,  $kg_{sausnas}$ .

Papildus celma biomasu virs sakņu kakla aprēķina, vispirms nosakot celma tilpumu (14. vienādojums), un pēc tam aprēķina no iegūtā tilpuma biomasu, izteiktu kilogramos (15. vienādojums) (Hakkila, 1975), kuru pieskaita celmu biomasai.

$$V_C = \frac{\left(\frac{D_0}{100}\right)^2}{4} * \pi * H \quad (14)$$

kur:

$V_C$  – celma tilpums,  $m^3$ ;

$D_0$  – celma caurmērs, cm;

$H$  – celma augstums, m.

$$M_S = V_C * B_K \quad (15)$$

kur:

$M_S$  – celma biomasas sausna, kg;

$V_C$  – celma tilpums,  $m^3$ ;

$B_K$  – koksnes relatīvais blīvums;

(eglei –  $394 \text{ kg m}^{-3}$ , priedei –  $476 \text{ kg m}^{-3}$ , bērzam –  $510 \text{ kg m}^{-3}$ ).

Iegūstamajā biomasā uzskaita celmu pazemes un virszemes daļu, kā arī lielākās saknes. Celmu koksnes kopējo resursu pieejamībai aprēķināti kopējie potenciālie resursi, kuri ietver visu celma virszemes, kā arī apakšzemes masu, ieskaitot arī mazās dimensijas saknes. Papildus aprēķinos izdalīti:

- tehniski pieejamie resursi, kurus teorētiski iespējams iegūt, veicot platību atcelmošanu; tajos ietilpst celmu virszemes un apakšzemes masa, ieskaitot lielās saknes;
- tehnoloģiski pieejamie resursi, kuri saistīti ar tehnikas un tehnoloģijas specifiku; tajos ieskaita celma virszemes un apakšzemes daļu, kā arī lielās saknes, atskaitot ražošanas zudums, kuri veido 38% (Lazdiņš et al., 2014). Zudumi saistīti ar iegūstamā materiāla sagatavošanu, kā arī transportēšanu līdz augšgala krautuvei (AGK).

Koksnes biomasas teorētiskiem aprēķiniem pārejai no absolūti sausas koksnes masas ( $t_{\text{sausnas}}$ ) uz masu pie mitruma 40% ( $tw = 40\%$ ) izmanto bāzes blīvumu (priedei –  $397 \text{ kg m}^{-3}$ , eglei –  $378 \text{ kg m}^{-3}$ , bērzam –  $470 \text{ kg m}^{-3}$  un apsei –  $393 \text{ kg m}^{-3}$ ) (Liepiņš, 2019). Pārreķiniem no masas ( $t$ ) uz nozarē pieņemto rādītāju beramie kubikmetri ( $\text{ber.m}^3$ ) izmanto MK noteikumu Nr. 812 32. pielikumu par “Oficiālas statistikas veidlapu paraugu apstiprināšanas un veidlapu aizpildīšanas un iesniegšanas noteikumi”, kur  $1 \text{ ber. m}^3 = 280 \text{ kg}$ . Lai pārietu no  $\text{ber.m}^3$  uz  $m^3$ , iegūto mērījumu daļa ar 2.5 (LR Ministru kabinets, 2016a). Celmu koksnes siltumspēja noteikta atbilstoši LVS EN 14918:2010 standartam.

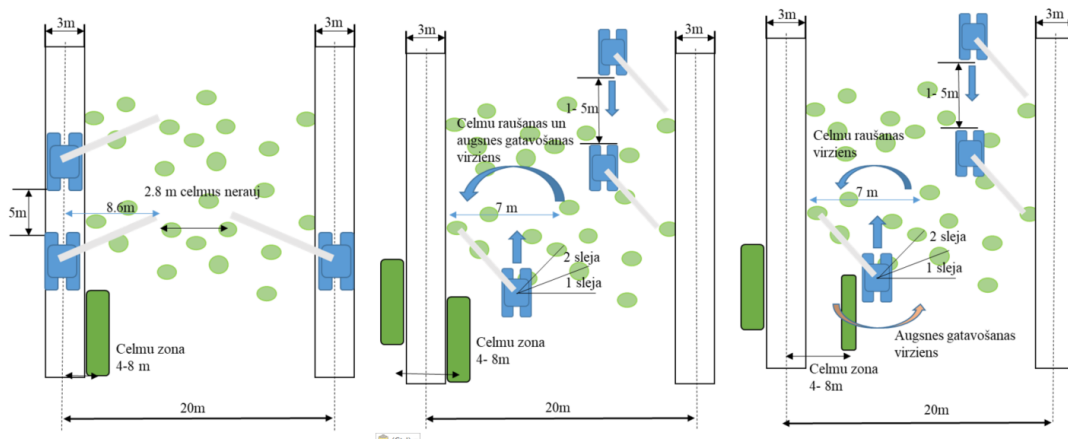
## 2.2. Celmu rāvēja darba paņēmieni un tehnisko prasību sagatavošanas metodika

Veicot celmu raušanu-plēšanu, kā arī augsnes sagatavošanu lielāku efektivitāti nodrošina multifunkcionāla iekārta, kas spēj šīs darbības veikt vienlaicīgi. Sagatavojot izcirtumos koksnes biokurināmo no celmu pazemes daļas, papildus iespējams veikt arī hidroloģiskā režīma uzlabošanas pasākumus, ierīkojot dziļvagas un ievalkas. Celmu izstrādes pētījumā izmantotas 3 darba metodes. Pirmā metode paredzēta darbam ar CBI celmu raušanas iekārtu. Otrā un trešā darba metode paredzētas MCR 500 iekārtai, kas izstrādāta, ņemot vērā mežsaimnieciskās vajadzības saistībā ar augsnes gatavošanu. Otrās un trešās metožu atšķirība ir saistīta ar iekārtu tehniskiem un tehnoloģiskiem uzlabojumiem, lai nodrošinātu augstāku ražīgumu un kvalitatīvāku augsnes sagatavošanu un mazākas  $\text{CO}_2$  emisijas, rēķinot uz vienu produktīvo stundu un saražotās produkcijas / sniegtā pakalpojuma vienību. Celmu raušanas darba metodes:

1. Veicot celmu raušanu ar CBI iekārtu, ekskavators pārvietojas pa tehnoloģiskajām brauktuvēm, veicot celmu raušanu un to nokraušanu, veidojot celmu kaudzes paralēli brauktuvei. Celmu raušanu veic no labās puses, perpendikulāri pārvietošanās virzienam (2.3. att., pa kreisi). Celmu raušanu sāk ar tuvāk esošajiem celmiem un turpina ar tālāk esošajiem celmiem. Celmu raušana joslā tiek pārtraukta, ja tehnika pēdējo celmu izrāvusi

ar maksimālo izlici. Tālāk pārvieto manipulatoru pa kreisi uz nākamo joslu, raušanu uzsākot ar celmiem, kuri ir tuvāk mašīnai.

2. Veicot celmu raušanu ar MCR 500 iekārtu, ekskavators pārvietojas starp tehnoloģiskajām brauktuvēm (2.3. att., pa vidū). Celmu raušanu veic no labās uz kreiso pusi. Celmu raušanu uzsāk perpendikulāri tehnikas pārvietošanās virzienam, veidojot 1. joslu. Pirmos celmus rauj tālāk no tehnikas ar maksimālo izlici un nokrauj paralēli brauktuvei, pēc tam celmus rauj virzienā uz tehnikas pusi un nokrauj paralēli brauktuvei. Vienlaikus ar celmu raušanu veic augsnes sagatavošanu, veidojot pacilas. Lielākas dimensijas celmiem, kuru caurmērs pārsniedz 25 cm, veic to pārplēšanu vairākās daļās. Savukārt, lai samazinātu minerālaugsnes īpatsvaru, pēc celmu izraušanas tos vairākas reizes ar manipulatoru paceļ un nomet zemē, to darot līdz brīdim, kad minerālaugsne vairs neatdalās no celma, bet ne vairāk kā 3 reizes. Pēc celmu izraušanas tehnika pārvietojas 5 m uz priekšu.
3. Veicot celmu raušanu ar uzlabotu MCR 500 iekārtu - ekskavators pārvietojas starp tehnoloģiskajām brauktuvēm (2.3. att., pa labi). Celmu raušanu veic no labās uz kreiso pusi perpendikulāri pārvietošanās virzienam. Celmus rauj no tālākās joslas punkta virzienā uz tehnikas pusi. Celmus nokrauj paralēli pārvietošanās virzienam, veidojot nelielas kaudzes 4–8 m attālumā no tehnoloģiskās brauktuves ass. Kad celmi tehnikas pārvietošanās virzienā ir izrauti, tehnika pārvietojas 1–5 m uz priekšu un sagatavo augsni aiz sevis. Ja izrautā celma caurmērs ir >25 cm, veic tā sadalīšanu vairākās daļās, izmantojot plēšanas nazi, vienlaicīgi veicot celma nomešanu vai purināšanu, lai samazinātu minerālaugsnes daudzumu.



Avots: autora veidots

2.3. att. Darba metodes celmu raušanā  
(pa kreisi CBI, vidū MCR 500 un pa labi uzlabota metodika MCR 500)

### 2.2.1. Tehniskā specifikācija iekārtas izgatavošanai

Praksē līdz šim plašāk izmantotas vairākas celmu raušanas-plēšanas iekārtas, kuru izgatavotājas valstis ir Zviedrija, Somija un Kanāda. Šo iekārtu specifika paredz celmu raušanu – plēšanu bez augsnes sagatavošanas iespējas. Iekārtas konstruēšanā jāņem vērā būtiskākās atšķirības starp Somijā, Zviedrijā un citur izgatavotām iekārtām. MCR 500 projektēšanas uzdevums:

- iekārtai jābūt jaunam multifunkcionālām produktam, kuram ir būtiski uzlabotas un papildinātas tehniskās īpašības (masa, gabarītmēri, konstrukcija u.c.) un ar to vienlaicīgi ir iespējama kā celmu izstrāde, tā augsnes sagatavošana, no celmiem atbrīvotajā platībā veidojot pacilas;
- kopējā masa  $\geq 1600$  kg, kas panākta, balstoties uz teorētiskās mehānikas aprēķiniem, kā arī modelējot iekārtas konstrukcijas elementus atbilstoši plānotajām slodzēm;
- iekārtai jābūt oriģinālai konstrukcijai pacilu ar plakanu virsmu veidošanai;

- jānodrošina izveidoto pacilu sablīvēšanai ar darba galvas pamata plāksnes daļu (LV 14769 B, 2014).

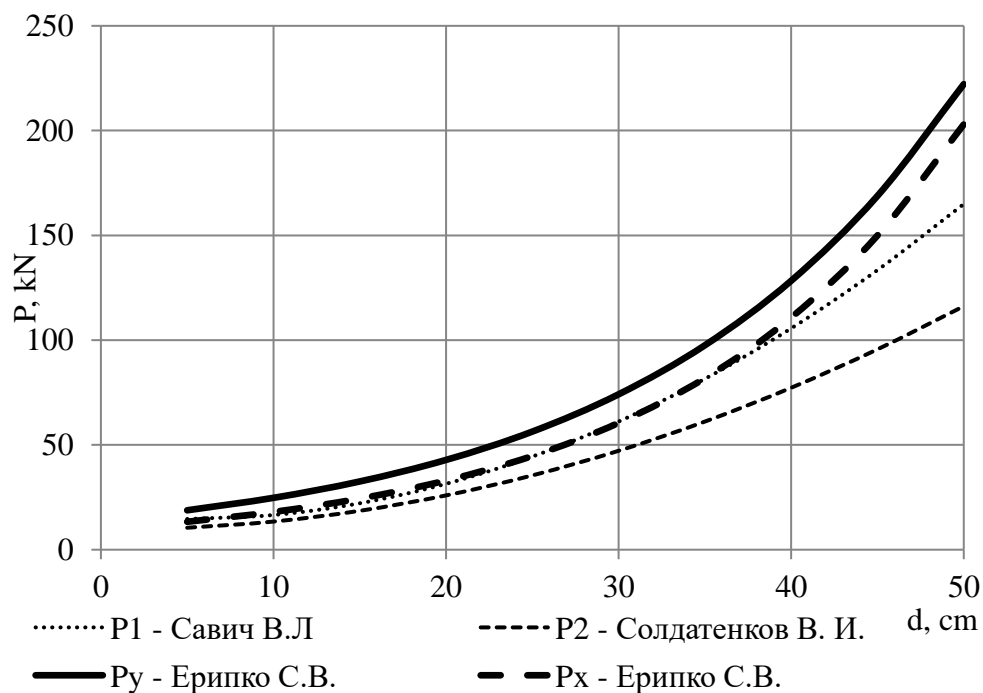
Iekārtas darbu nodrošina viens galvenais cilindrs, kurš stiprināts pie ekskavatora izlices un celmu rāvēja korpusa. Celmu plēšanai izmanto pretnazi, kuru darbina hidrocilindrs, kurš izveidots rāvēja galvas korpusā, ar tā spēku virzoties pretī celmu rāvējam. Celmu raušanu veic tehnoloģiskie elementi ekskavatora kausā (ilķņveida nagi, naži), tos ievirzot zem celma pamatnes un ar hidrocilindru griežot ap savu asi, reizē palīdzot ar izlices kustību vajadzīgajā virzienā pārraut celma galvenās saknes un izcelt celmu no zemes (2.4. att.). Ja tas neizdodas, lielāka caurmēra celmiem ar kausa satvērējnazi un pretnazi pārgriež vai norauj galvenās celma saknes. Pēc celma izraušanas, nepieciešamības gadījumā to vispirms pārkniebjot vairākās daļās un nokrauj paralēli tehnoloģiskai brauktuvei.



Avots: autora foto

#### 2.4. att. Lielu celmu raušanas secība

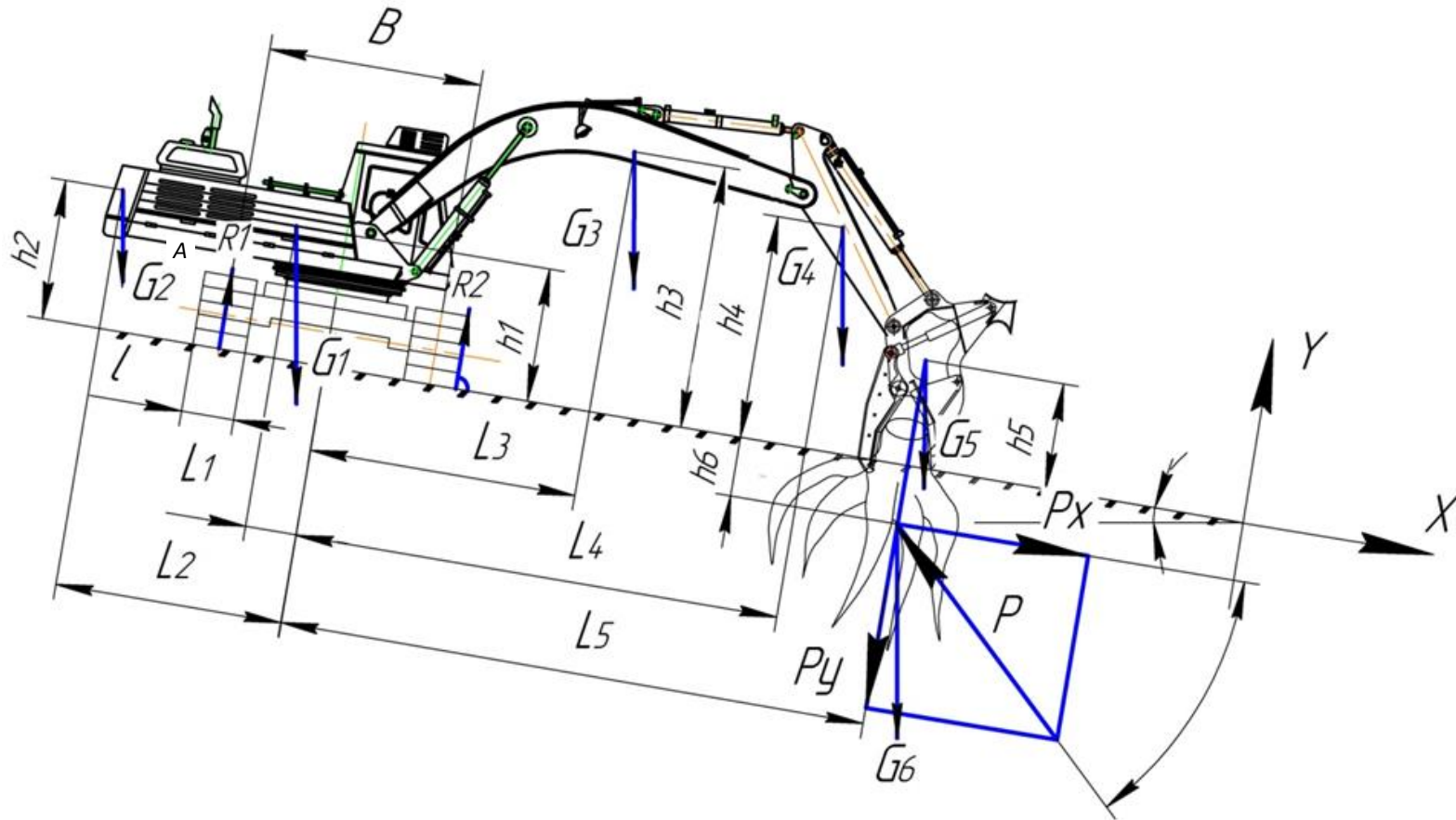
Darbinot ekskavatora tipa celmu rāvēju, pilnīgi noslogota hidromanipulatora pamata ierobežojošais un ekspluatāciju ietekmējošais rādītājs ir šķērsstabilitāte. Informācijas avotos trūkst metodisko norādījumu rekomendāciju izstrādei, veicot celmu raušanu ar tādu ekskavatora tehnoloģisko aprīkojumu, kurš ietekmē bāzes mašīnu. Ņemot vērā galvenokārt šķērsstabilitāti, ir skaidrs, ka celmu raušanas efektivitāte tiek ievērojami ierobežota ar hidromanipulatora celtspēju. Lai konstatētu šo sakarību, pirmais uzdevums ir noskaidrot, kā celma caurmērs ietekmē celma raušanas spēku. Šajā virzienā zināmi V. Saiviča (Савич В. Л., 2013) darbi, kuros analizēts celmu raušanas spēks, ja celmu izrauj vertikāli uz augšu, un arī noteikts pielietotais spēks, atkarībā no celma caurmēra. Iegūto datu precizitāte uzrādīja 8-10% starpību starp teorētiski aprēķināto spēku un praktiski pielietoto raušanas spēku. V. Soldatenkovs (Савич & Солдатенков, 2009), veicot analogiskus pētījumus, konstatēja, ka, raujot celmus attālināti no bāzes mašīnas, celmu raušanas pretestības spēks jāsadala divās komponentēs. Pirmā komponente saistīta ar to spēku, ar kādu darba galvu iegremdē augsnē celma tuvumā, pārvarot augsnes pretestību un pārraujot sakņu sistēmas dažus atzarus. Otrā komponente saistīta ar celmu vertikālu izcelšanu no augsnes. 2.5. att. atspoguļotas V. Saviča (P1) un V. Soldatenkova (P2) iegūtas sakarības celma izcelšanas spēka un celma caurmēra raksturošanai (Савич, 2013; Савич & Солдатенков, 2009).



Avots: autora veidots

### 2.5. att. Sakarība starp celma izraušanas spēku un celma caurmēru

Lai modelētu celma rāvēja darbību, izmantoti S. Eginko (Египко, 2009) pētījumu rezultāti, kuros konstatēts, ka celmu raušanā ir divi svarīgi izcelšanas spēki – viens no tiem vertikālajā virzienā ( $P_y$ ), un otrs horizontālajā virzienā ( $P_x$ ), kā to var redzēt zemāk ievietotajā attēlā (2.6. att.). Celmu raušanas iekārtas aprēķiniem izveidota pamatshēma (2.6. att.). Izmantojot izstrādāto shēmu, var vērtēt ekskavatora tipa celmu rāvēja stabilitāti, veicot celmu raušanu, un noteikt darbības efektivitāti, izmantojot dažādus darba paņēmienus, atkarībā no atbalsta virsmas slīpuma, celma caurmēra, celma novietojuma un augstuma, ņemot vērā arī bāzes šasijas tehniskos parametrus.



Avots: autora veidots

### 2.6. att. Celmu raušanas spēka aprēķināšana

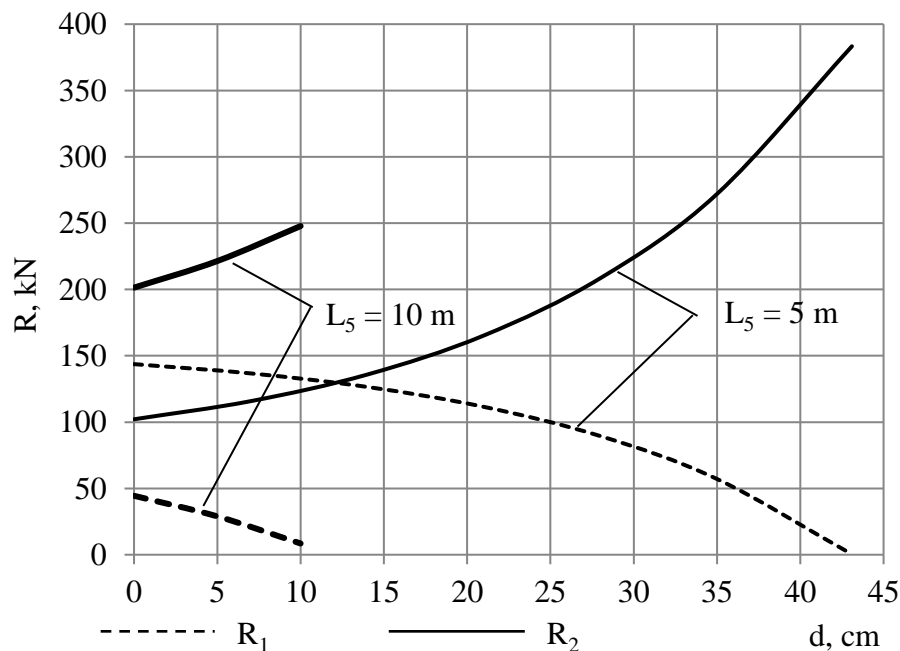
$G_1 - G_6$  – bāzes šasijas, atsvara, hidromanipulatora sastāvdaļu, tehnoloģiskās iekārtas un celma pašmasai atbilstošs smaguma spēks N;  $L_1 - L_6$  – attālums no bāzes šasijas, atsvars, hidromanipulatora sastāvdaļas, tehnoloģiskā iekārta, celma pašmasas smaguma centrs līdz ekskavatora ass līnijai, m;  $h_1 - h_5$  – augstums, kādā atrodas sastāvdaļu smaguma centri, m;  $h_6$  – celma augstums horizontālā plaknē, m;  $B$  – ekskavatora bāze, m;  $l$  – kāpurķēdes platums, m;  $P_x$ ;  $P_y$  – celma raušanas komponentes, N;  $P$  – celma raušanas pamatspēks, N;  $\alpha$  – zemes virsmas slīpums, grādi;  $\varphi$  – leņķis starp celmu raušanas virsmu un atbalsta virsmu, grādi;  $A$  – apgāšanās punkts,  $R_1, R_2$  – augsnes reakcijas spēks zem kāpurķēdēm, N.

Analīzei izmantots bāzes traktors NewHolland E215B kopā ar tehnoloģisko aprīkojumu. Šķērsstabilitāte vērtēta pēc augsnes reakcijas zem kāpurķēdēm. Ņemot vērā augšminēto shēmu (2.6. att.) un reakciju uz kāpurķēdēm  $R_1$  un  $R_2$ , šķērsstabilitāte noteikta ar sekojošiem vienādojumiem:

$$\begin{aligned}
 R_1 = & [G_2(L_2 + 0.5B + 0.5l)\cos\alpha - G_2h_2\sin\alpha + G_1(L_1 + 0.5B + 0.5l)\cos\alpha \\
 & - G_1h_1\sin\alpha - G_3(L_3 + 0.5B + 0.5l)\cos\alpha - G_3h_3\sin\alpha \\
 & - G_4(L_4 + 0.5B + 0.5l)\cos\alpha - G_4h_4\sin\alpha \\
 & - (G_5 + G_6)(L_5 - 0.5B - 0.5l)\cos\alpha - G_5h_5\sin\alpha - G_6h_6\sin\alpha \\
 & - Py(L_5 - 0.5B - 0.5l)\sin\varphi + Pxh_6\cos\varphi]/(B + 0.5l)
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 R_2 = & [-G_2(L_2 - 0.5B)\cos\alpha + G_2h_2\sin\alpha + G_1(0.5B - L_1)\cos\alpha + G_1h_1\sin\alpha \\
 & + G_3(L_3 + 0.5B)\cos\alpha + G_3h_3\sin\alpha + G_4(L_4 + 0.5B)\cos\alpha \\
 & + G_4h_4\sin\alpha + (G_5 + G_6)(L_5 + 0.5B)\cos\alpha + G_5h_5\sin\alpha \\
 & + G_6h_6\sin\alpha + Py(L_5 + 0.5B)\sin\varphi - Pxh_6\cos\varphi]/(B + 0.5l)
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Pētījumā vērtēti dažādu rādītāju ietekme uz ražīgumu un slodzēm, piemēram, celma caurmērs, celma smaguma spēka atkarība no augsnes līmeņa, celma smaguma spēka darbības virziens, hidromanipulatora izlīces attālums, kāpurķēdes platums. Konstatēts, ka hidromanipulatora izlīces lielāks rādītājs ievērojami samazina celmu rāvēja ekspluatācijas iespējas. Piemēram, pie hidromanipulatora minimālas izlīces ( $L_{\min} = 4$  m), ar vertikālo celmu raušanas spēku nesamazinot šķērsstabilitāti, var raut celmus ar caurmēru 43 cm, bet, palielinot hidromanipulatora izlīci 2.5 reizes, maksimāli izraujamā celma caurmērs samazinās līdz 11.7 cm (2.7. att.). Līdzīgas atziņas ir arī I. Czupy publikācijā (Czupy & Horváth-Szováti, 2005 2013; Lindross ar al., 2010).

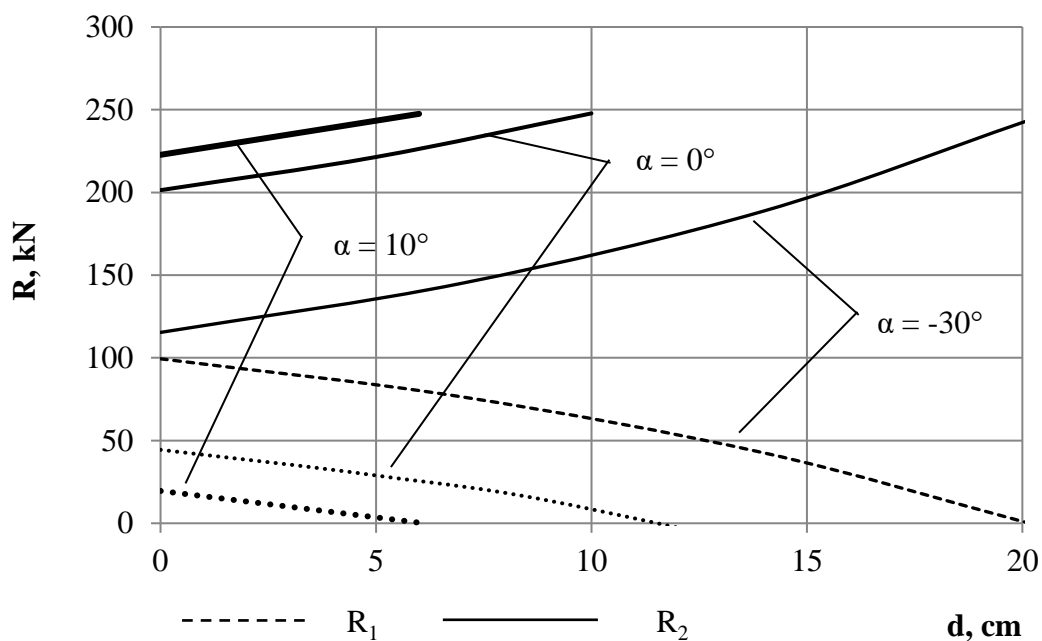


Avots: autora veidots

### 2.7. att. Celma caurmēra (d) un hidromanipulatora ( $L_5$ ) izlīces ietekme uz atbalsta kāpurķēžu reakciju

Strādājot uz nogāzēm (virzienā gan uz leju, gan uz augšu), slīpumā uz augšu ( $30^\circ$ ) ar maksimālo hidromanipulatora izlīci var raut celmus ar caurmēru līdz 20 cm, bet jau  $10^\circ$  slīpumā

uz leju tehnika nevar raut celmus ar lielāku caurmēru kā 6 cm sakarā ar pretējās kāpurķēdes atraušanos no augsnes (2.8. att.).



Avots: autora veidots

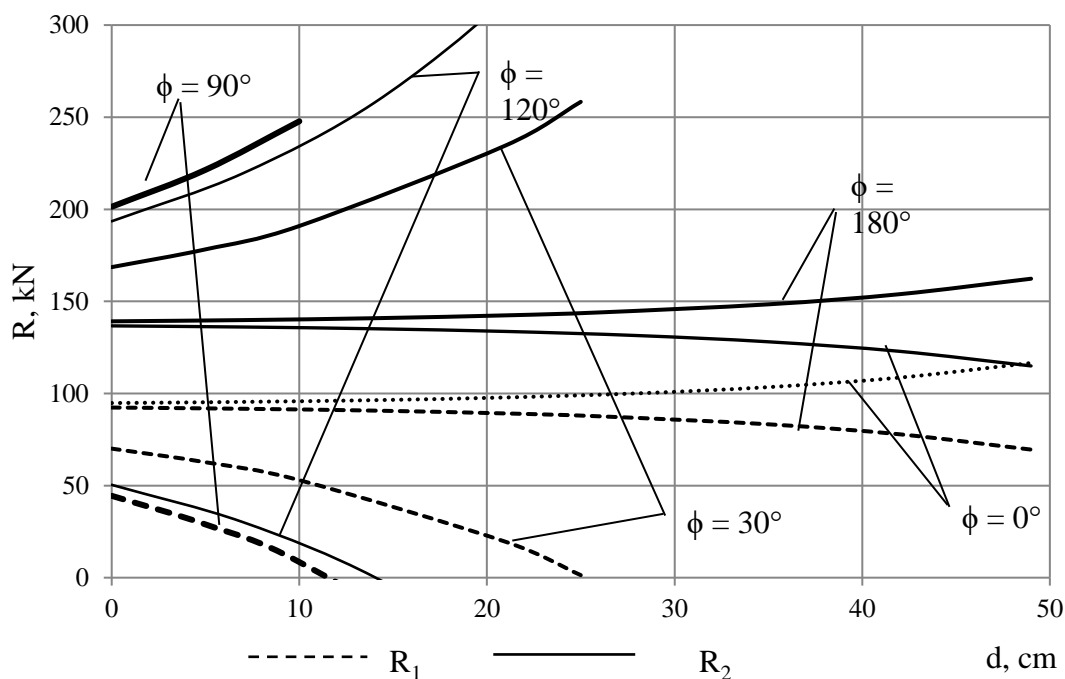
## 2.8. att. Celma caurmēra (d) un darba virsmas slīpuma ietekme uz atbalsta kāpurķēdēm

Papildus augšminētajiem rādītājiem apskatīts šāds celmu raušanas paņēmieni:

- tehnoloģiskās iekārtas vertikālā kustība ( $\varphi = 90^\circ$ );
- hidromanipulators ir pozīcijā, kurā  $\varphi = 0^\circ$  vai  $\varphi = 180^\circ$ ;
- tehnoloģiskās iekārtas kombinētā kustība ( $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ ), ja kustība notiek no ekskavatora virzienā uz darba iekārtas pusi (prom no ekskavatora,  $90^\circ < \varphi < 180^\circ$ ).

Konstatēts, ka celmu raušana ar vertikālo kustību ir vismazākā reakcija (2.9. att.), bet tāds darba paņēmieni nav efektīvs ražošanas apstākļos. Šādā veidā raujot celmus un kustinot tehnoloģisko aprīkojumu horizontālajā virsmā  $30^\circ$  leņķī pret bāzes mašīnas atbalsta virsmu, tiek panākts, ka reakcija R zem kāpurķēdes palielinās 2.16 - 6.25 reizes (2.9. att.), celma caurmēram palielinoties no 5 līdz 10 cm. Tajā pašā aprēķinā konstatēts, ka pie noteiktās manipulatora izlīces maksimālā celma caurmērs ir līdz 25 cm.



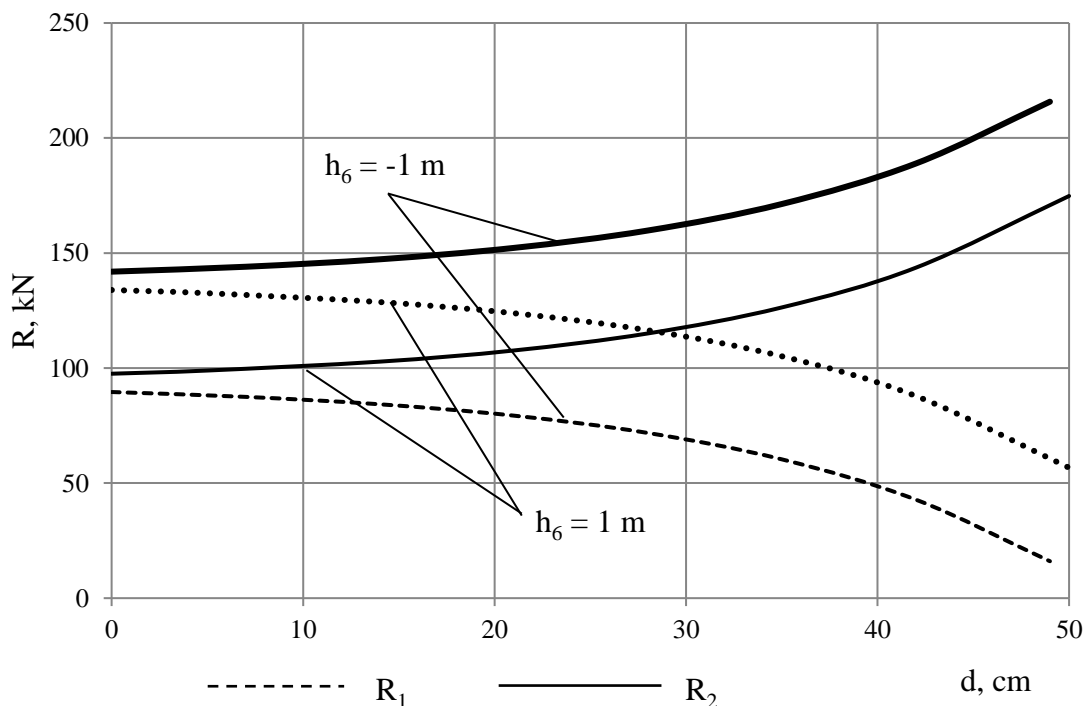


Avots: autora veidots

**2.9. att. Celma caurmēra (d) un leņķa (φ) starp raušanas virzienu pret atbalsta virsmu ietekme uz stabilizējošo reakciju (R) kāpurķēdes bāzes ekskavatoram**

Pētījumā konstatēts, ka visdrošākā šķērsstabilitāte panākta uz horizontālas virsmas, un celmu raušanas iekārtai uz ekskavatora bāzes ir iespējams raut celmus ar caurmēru līdz 50 cm un vairāk. Limitējošais rādītājs ir visas mašīnas saķeres spēja ar grunti.

Atbalsta reakciju izmaiņas zem ekskavatora kāpurķēdēm horizontālajā virsmā atkarībā no celmu raušanas spēka vektora un celmu izvietojuma attiecībā pret horizontālo līniju parādītas 2.10. att.



Avots: autora veidots

**2.10. att. Celmu caurmēra (d) un celma augstuma (h<sub>6</sub>) ietekme uz izvilkšanas spēku, ja izvilkšanas spēka vektors ir horizontālā plaknē**

Ņemot vērā iegūtās sakarības, kļūst saprotams, ka tad, ja celma izvilksanas spēks tiek pielikts zemāk nekā atrodas ekskavatora atbalsta virsma, tad mašīnas šķērsstabilitāte palielinās. Attēlā (2.10. att.) redzams: ja celms atrodas 1 m virs atbalsta virsmas, tad notiek ekskavatora atbalsta reakcijas samazinājums no 8.2 kN ( $d_{\text{celmam}} = 5 \text{ cm}$ ) līdz 0.53 kN ( $d_{\text{celmam}} = 50 \text{ cm}$ ) uz katriem 10 cm celma paaugstinājuma pret atbalsta virsmu, un otrādi, ja celms atrodas 1 m zemāk pret ekskavatora atbalsta virsmu, notiek atbalsta reakcijas palielinājums no 0.53 kN ( $d_{\text{celmam}} = 5 \text{ cm}$ ) līdz 8.2 kN ( $d_{\text{celmam}} = 50 \text{ cm}$ ) uz katriem 10 cm celma pazeminājuma pret ekskavatora atbalsta virsmu.

Pētījumā izmantotajam ekskavatoram NewHolland E215B var uzstādīt kāpurķēdes ar platumu 600, 700 vai 800 mm. Tomēr kāpurķēžu gabarīti un masas rādītāji var atstāt ievērojamu ietekmi un ekskavatora šķērsstabilitāti. Aprēķini norāda, ka kāpurķēžu nomainīšana no 600 mm uz 800 mm atļauj ar maksimālo izlīci raut celmus ar caurmēru 16 cm, bet tikai 12 cm ar šaurajām kāpurķēdēm. Papildus kāpurķēžu nomainīšanai uz platākām palielinās arī mašīnas caurgājāmība.

Multifunkcionālas celmu izstrādes un augsnes pacilu sagatavošanas iekārtas tehniskās prasības izstrādātas, balstoties uz līdzšinējo pieredzi celmu raušanā Latvijā, strādājot ar CBI darba galvu, kā arī aprēķiniem saistībā ar tehnikas stabilitāti un veiktspēju atkarībā no celma caurmēra un darba zonas (manipulatora izlīces).

- **Iekārtas pielietojums.** Izstrādājams produkts, celmu izstrādes un augsnes pacilu gatavošanas iekārta, atšķiras ar būtiski uzlabotu funkcionalitāti salīdzinājumā ar alternatīviem risinājumiem, kuri pieejami tirgū. Iekārtai ražošanas apstākļos jāspēj vienlaicīgi veikt celmu izstrādi un sagatavot pacilas meža atjaunošanai atbilstoši pastāvošajiem normatīviem (LR Ministru kabinets, 2000, 2010). Izgatavojamā iekārta paredzēta dažādu izmēru celmu raušanai, plēšanai, tālākam transportam uz AGK un drupināšanai piemērotās frakcijās, kā arī augsnes gatavošanai. Iekārta uzstādāma uz kāpurķēžu ekskavatora, izmantojot ātri montējamus savienojumus.
- **Ekspluatācijas apstākļi.** Iekārta paredzēta celmu izstrādei no pabeigtām atjaunošanas cirtēm uz sausām vai slapjām minerālaugsnēm, kā arī susinātajām organiskajām augsnēm. Iekārtas ekspluatācijas apstākļi paredz izmantošanu augsnēs ar dažādu granulometrisku sastāvu.
- **Izpildāmo darbu kvalitātes rādītāji.** Iekārtai ražošanas apstākļos jāspēj izraut celms ar caurmēru 60 cm, nepieciešamības gadījumā to sadalot atsevišķos gabalos tālākam transportam un pārstrādei. Papildus ar iekārtu ir jāvar samazināt celmu koksnei pieķērušās augsnes daudzumu, veicot mešanas vai purināšanas paņēmienus. Strādājot ar pacilu gatavotāju, joslas laukumam jābūt lielākam nekā 2500 cm<sup>2</sup>, nodrošinot vienmērīgu augsnes sablīvējumu un kompaktnību visās pacilas daļās. Izveidotajās pacilās uz smilts un mālsmilts augsnēm sablīvējumam jābūt lielākam nekā 0.8 MPa, uz kūdras augsnēm – 0.76 MPa, bet smagās augsnēs – līdz 2.2 MPa.
- **Tehniskie rādītāji.** Iekārta montējama uz ekskavatora, izmantojot ātri nostiprināmos savienojumus. Uzstādāmā iekārta pieslēdzama standarta hidrosistēmai bez tās pielāgošanas vai pārbūves. Iekārta sastāv no 2 nekustīgiem asmeņiem un viena pretnaža, ar kura palīdzību tiek nodrošināta sakņu pārgriešana, kā arī, nepieciešamības gadījumā, celmu sadalīšana sīkākos gabalos. Iekārta augsnes gatavošanai sastāv no izvirzītas metāla plāksnes, kuras darbība iespējama visā izlīces diapazonā. Iekārtas maksimālais atvērums ir 1500 mm, nekustīgo asmeņu iedziļinājums > 900 mm. Iekārtas darba zona celmu raušanā un augsnes sagatavošanā vienāda ar ekskavatora izlīces rādītājiem. Iekārtas masa ir līdz 1600 kg. Iekārta sastāv no viena galvenā hidrocilindra, kas montējams uz ekskavatora izlīces, un pašā iekārtā iemontēta hidrocilindra, ar kura palīdzību iespējams nodrošināt sakņu un celma pārgriešanu. Izmantojot nekustīgo asmeni un pretnazi, jānodrošina iespēja celmu vai tā daļu satvert un pārvietot uz nepieciešamo vietu.

### 2.3. Enerģbilances uzlabošanas metodika

Lai augsnes sagatavošanai pirms meža atjaunošanas nebūtu jālieto kāda tieši šim nolūkam paredzēta cita mašīna, augsni var sagatavot ar to pašu ekskavatoru, ko izmanto celmu raušanai. Tādā gadījumā celmu izstrādei izmantotās meža mašīnas operatoram jāveido pacilas, to darot paralēli celmu raušanai.

Par pacilu sauc pauguru, ko veido apvērsta velēna, kas uzklāta blakus esošai velēnai (2.11. att.). Uz šī paugura veidojas stādiem labvēlīgi apstākļi, tādēļ uz mākslīgi izveidotām pacilām koku augšana ir straujāka, kā arī uzlabojas stādu izturība pret nelabvēlīgiem vides faktoriem.



Avots: D. Lazdiņa

#### 2.11. att. Pacilu struktūra – apvērsts velēnas slānis

Starp dažādām izstrādātajām pacilu sagatavošanas metodēm par piemērotāko uzskatīta to sagatavošana atcelmotajā platībā, kura atrodas aiz ekskavatora. Rekomendējama attālums starp pacilām ir 2 m. Atbilstoši kvalitātes prasībām mineralizācijas laukumam jābūt vismaz 0.4 m<sup>2</sup>.

Darba laika uzskaitē, veicot celmu raušanu-plēšanu, papildus izdalīts darba elements “pacilu gatavošana”, vienlaikus uzskaitot arī sagatavoto pacilu skaitu. Datu salīdzināšanai pētījuma objektos augsne gatavota arī ar alternatīvu paņēmienu, izmantojot pasīvo frēzi. Tādā gadījumā meža mašīnas operatoram izvīzītais uzdevums ir sagatavot augsni atbilstoši līdzšinējai praksei, t.i., veidot līdz 20 cm dziļas vagas 2.5 m attālumā vienu no otras. Augsnes gatavošanas laikā veikta darba laika uzskaitē, izdalot 8 elementus (2.4. tabula.). Par vienu darba ciklu uzskata augsnes sagatavošana ierīkotā parauglaukumā (platība 0.4 - 1.0 ha).

#### 2.4. tabula. Augsnes gatavošana ar pasīvo disku frēzi

Nr.	Darba laika elements	Paskaidrojums
1.	Uzbraukšana vai nobraukšana no treilera	Uzbraukšana vai nobraukšana no treilera, pārvietojoties starp cirmsmām
2.	Brauciens uz vai no cirsmas	Brauciens no bāzes uz cirsmu vai atpakaļ
3.	Sagatavošanās darbam	Agregātu pārbaude un iedarbināšana
4.	Augsnes gatavošana	Augsnes gatavošana ar iedarbinātu darba agregātu
5.	Frēze pacelta (tehnikas apgrīšanās)	Pārvietošanās ar paceltu frēzi (manevri, pārmitru vietu apbraukšana u.c.)
6.	Citas operācijas	Citas ar darbu saistītas operācijas
7.	Pārējās darbības	Citas ar darbu nesaistītas operācijas
8.	Tehnikas remonts	Tehnikas remonts uz lauka, ja tas atbilst ikdienas darbu kvalifikācijai (ieķērušos zaru izņemšana utt.)

Avots: autora veidots

Produktīvajā darba laikā nav iekļauta uzbraukšana un nobraukšana no treilera puspiekabes, brauciens uz cirsmu un ar darbu nesaistītas darbības. Energobilances analīzei aprēķini veikti, balstoties uz darba laika uzskaiti un patērēto energoresursu – izlieto to dīzeļdegvielu.

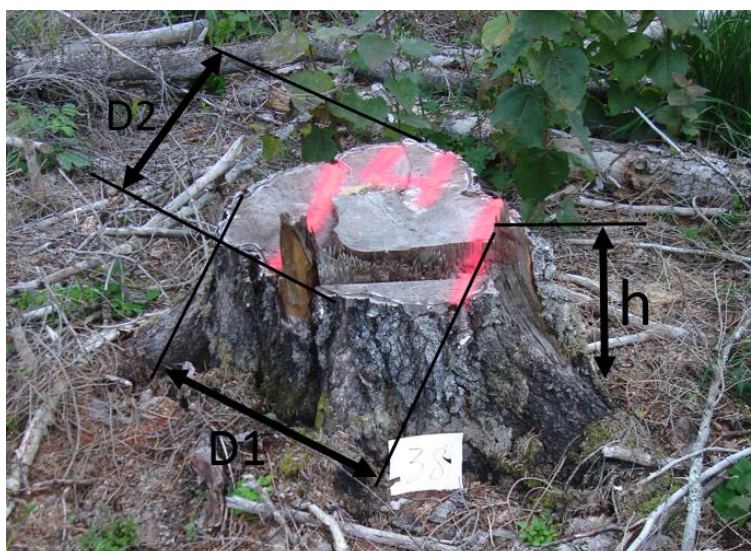
## 2.4. Energoefektivitātes uzlabošanas tehnoloģijas izstrādes metodika

Darba laika uzskaitē sadalījumā pa elementiem visā izstrādes procesā balstās uz katra darba elementa pabeigšanas laika fiksēšanu katram darba ciklam. Uzsākot darba laika uzskaiti, hronometrētājs nospiež pogu “Sākt” (palaiž laika uzskaiti) un darba procesā fiksē katra izdalītā darba elementa pabeigšanu. Nepieciešamības gadījumā papildus veiktas piezīmes, lai tālākā datu apstrādes procesā varētu izdarīt nepieciešamās korekcijas darba laika uzskaitē. Darba laika uzskaitē veikta centiminūtēs (100 centi min. = 1 min). Tas nepieciešams, lai laika patēriņu sadalījumā pa darba elementiem varētu uzskaitīt precīzāk, jo 1 centi min. = 0.6 s.

### 2.4.1. Celmu uzmērīšana un marķēšana pirms izstrādes

Celmu marķēšana pētījumā veikta, lai tālākā datu apstrādē būtu iespējams noteikt izrauto celmu apjomu un aprēķināt ražīguma rādītājus. Celmi pētījuma objektos uzmērīti un marķēti pirms plānotās izstrādes. Par katru marķēto celmu iegūti sekojoši dati:

- celma augstums (cm), augstuma noteikšanai definēta zemes virsma (2.12. att.) jeb atskaites punkts, par kuru uzskata līdzenu, cietu virsmu, no kuras noņemtas lapas, zari un sūna. Mērījumu veic līdz celma augšējai malai (zāģējuma plaknei);
- caurmērs (cm), mērījumu veic celma augšējā daļā, 5 cm zemāk no zāģējuma plaknes; precīzai caurmēra aprēķināšanai nepieciešami divi savstarpēji perpendikulāri mērījumi (2.12. att.);
- nozāģētā koka suga;
- bojājuma pakāpe, šajā gadījumā vizuāli novērtē un atsevišķi nodala veselus un trupējušus celmus. Par trupējušu uzskata celmu, kurā konstatēta mīkstā trupe.



Avots: autora foto

2.12. att. Celmu uzmērīšana

## 2.4.2. Celmu raušanas – plēšanas metodika

Pētījumos izmantoti 2 veidu ekskavatori, uz kuriem uzstādīti pētījumā izmantotie mehānismi. CBI celmu raušanas kauss uzstādīts uz Komatsu PC210LC, bet MCR 500 uz New Holland E215B ekskavatora.

Komatsu ekskavatora raksturojošie rādītāji – dzinēja jauda 116 kW, pilna masa 22260 kg, hidrodzinējs nodrošina 39 MPa spiedienu hidrosistēmā, maksimālā eļļas padeve  $2 \times 219 \text{ L min}^{-1}$ , ekskavatora pārvietošanās ātrums no 3 līdz  $5.5 \text{ km h}^{-1}$ , mašīnas platums 2980 mm, klīrens – 440 mm, maksimālā izlice 8660 mm.

New Holland raksturojošie rādītāji – dzinēja jauda 118 kW, pilna mašīnas masa – 23310 kg, hidrodzinējs nodrošina 37.8 MPa spiedienu hidrosistēmā, maksimālā eļļas padeve  $2 \times 220 \text{ L min}^{-1}$ , pārvietošanās ātrums līdz  $6 \text{ km h}^{-1}$ , platums 2600 mm, klīrens 470 mm, maksimālā izlice 7500 mm.

Darba laika elementi celmu raušanas procesā visos pētījumos izdalīti vienādi gan sadalījumā pa objektiem, gan arī pa darba galvām (CBI un MCR 500), tādējādi izslēdzot iespēju par datu atšķirīgu interpretāciju tālākā datu apstrādē. Celmu raušanai izdalīti 13 darba elementi (2.5. tabula) (Lazdiņš et al., 2012; Lazdiņš & Zimelis, 2012; Zimelis et al., 2013; Lazdiņš et al., 2014; Zimelis et al., 2014; Zimelis et al., 2018). Par 1 darba ciklu pētījumā uzskatīts visu tehnoloģisko darbību kopums, kas noslēdzas ar celma nomešanu pievešanas ceļā malā, tādējādi tālākā datu apstrādē iespējams matemātiski modelēt ražīguma izmaiņas atkarībā no koku sugas, celma caurmēra un augstuma.

2.5. tabula. Celmu raušanas – plēšanas darba laika uzskaites elementi

Nr.	Darba laika elements	Paskaidrojums
1.	Pagrieziens	Ekskavatora torņa griešanās, lai veiktu augsnes sagatavošanu vai citas darbības.
2.	Pārbrauciens	Mašīnas pārvietošanās pa cirsma darba procesā, kas saistīta ar celmu raušanu – plēšanu.
3.	Sniegšanās	Sniegšanās līdz celmam, darbības ar manipulatoru.
4.	Satveršana	Celmu satveršana, mehānisma iespiešana augsnē.
5.	Izcelšana	Celmu raušana, līdz celms tiek izcelts ārā no augsnes.
6.	Saplēšana	Celmu sadalīšana sīkākās daļās.
7.	Purināšana	Augsnes atdalīšana no celma pēc izraušanas.
8.	Nomešana	Celmu pacelšana un nomešana.
9.	Skarificēšana	Pacilu gatavošana.
10.	Citas operācijas	Citas ar darbu saistītas operācijas, piemēram, celmu kaudzes sakārtošana, bedres pielīdzināšana u.t.t.
11.	Pārējās darbības	Citas ar darbu nesaistītas operācijas.
12.	Iebraukšana	Iebraukšana cirsma no degvielas uzpildes vai atpūtas vietas.
13.	Izbraukšana	Izbraukšana, lai uzpildītu degvielu vai pēc maiņas beigām.

Avots: Autora veidots

Produktīvā darba laika aprēķināšanai ieskaitīti visi darba elementi, izņemot iebraukšanu, izbraukšanu un Pārējās darbības. Lai aprēķinātu un savstarpēji salīdzinātu saražotās produkcijas daudzumu noteiktā laika vienībā, pielieto ražīguma algoritmu (Sarmulis & Saveljevs, 2015):

$$R = \frac{Q}{Tn} \quad (18)$$

kur:

R – darba ražīgums uz vienu cilvēku vienā laika vienībā, izteikts saražotās produkcijas vienībās, t h<sup>-1</sup> vai m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>;

Q – saražotās produkcijas vienību kopējais apjoms, t vai m<sup>3</sup>;

T – kopējais izlietotais darba laiks, h;

n – darba veicēju skaits.

Ražīguma rādītāju salīdzināšanai starp MCR 500 un MCR 500 II izstrādātie celmu sadalīti caurmēra grupās (2.6. tabula), lai varētu analizēt uzlabojumu efektivitāti.

2.6. tabula. **Celmu grupas**

Grupas Nr.	Celmu caurmēra diapazons, cm
1.	līdz 10
2.	10.1 līdz 20
3.	20.1 līdz 30
4.	30.1 līdz 40
5.	virs 40.1

Avots: autora veidots

### 2.4.3. Celmu pievešanas izpētes metodika

Celmu pievešanai izmantoti 3 dažādi forvarderi: 2006. gadā ražotais John Deere 810D, 2007. gada Logset 4F un 2012. gada Ponsse Gazelle.

John Deere 810D raksturojošie rādītāji: dzinēja jauda 86 kW, manipulatora izlice 7200 mm, mašīnas garums 8695 mm, platums 2530 mm, klīrenss – 590 mm, forvardera pašmasa 10400 kg, kravnesība 9000 kg, kravas tilpnes šķērslaukums 3.4 m<sup>2</sup>.

Logset 4F raksturojošie rādītāji: dzinēja jauda 125 kW, manipulatora izlice 10000 mm, mašīnas garums 9373 mm, platums 2480 mm, klīrenss – 610 mm, pašmasa 13500 kg, kravnesība – 10000 kg, kravas tilpnes šķērslaukums 3.9 m<sup>2</sup>.

Ponsse Gazelle raksturojošie rādītāji: dzinēja jauda 129 kW, manipulatora izlice 10000 mm, mašīnas garums 8800 mm, platums 2500 mm, klīrenss – 600 mm, pašmasa 12400 kg, kravnesība 10000 kg, kravas tilpnes šķērslaukums 3.8 m<sup>2</sup>.

Forvarderi aprīkoti ar zaru greifera satvērējiem, tādējādi uzlabojot ražīguma rādītājus un samazinot augsnes izvešanu reizē ar celmu koksni.

Celmu pievešanai uz AGK darba laika uzskaitē veikta 12 darba elementiem (

2.7. tabula.) (Lazdiņš et al., 2009; Lazdiņš & Hofsten, 2009; Lazdiņš & Zimelis, 2012). Par darba cikla noslēgumu pētījumā uzskata celma iekraušanu forvardera kravas tilpnē, savukārt par vienu kravas ciklu uzskata forvardera plānoto maršrutu, kurš sākas un beidzas AGK.

## 2.7. tabula. Pievešanas darba laika sadalījums

Nr.	Darba laika elements	Paskaidrojums
1.	Pārvietošanās	Pārvietošanās pa cirsma kravas veidošanas procesā.
2.	Manipulators	Darbs celmu iekraušanas procesā, kustinot manipulatoru.
3.	Satveršana	Celma vai tā daļas satveršana uz zemes līdz brīdim, kad uzsāk iekraušanu.
4.	Iekraušana	Celma pārvietošana uz kravas tilpni.
5.	Izkraušana	Celma izkraušana AGK.
6.	Kārtošana	Celmu kārtošana kravas tilpnē.
7.	Citas operācijas	Citas ar darbu saistītas operācijas.
8.	Pārējās darbības	Citas ar darbu nesaistītas darbības.
9.	Svēršana	Kravas svēršana, pirms forvarders iebrauc cirmā (tukša krava) un izbrauc no cirmsas (pilna krava).
10.	Pārbraukšana	Pārbraukšana starp izmēģinājuma objektiem.
11.	Iebraukšana	Iebraukšana cirmā, uzsākot darbu vai pēc izkraušanās AGK.
12.	Izbraukšana	Izbraukšana no cirmsas ar kravu vai bez tās.

Avots: autora veidots

Forvardera pārvietošanās ātruma aprēķināšanai izvēlētā ceļa posma garums cirmā tiek mērīts iebraukšanai (ar tukšu kravu) no AGK līdz uzkraušanās vietai, bet izbraukšanas procesā (ar pilnu kravu) – no braukšanas uzsākšanas līdz AGK. Ātruma aprēķiniem nepieciešamie mērījumi veikti katrai 5 kravai. Produktīvā darba laika aprēķināšanai iekļauti visi darba cikli, izņemot svēršanu un Pārējās darbības.

Pievestā apjoma masas noteikšanai izmantotas svēršanas platformas RW-15P. Svēršanas diapazons šai iekārtai ir līdz 15000 kg, iedaļas vērtība 10 kg, platformas izmērs 900×500×39 mm. Svari sastāv no vadības bloka un divām svaru platformām. Svēršanas procesa nodrošināšanai lauku apstākļos platformas nostiprinātas uz iepriekš zemē ieraktām 1100×800 mm koka plāksnēm, kas slodzi izlīdzina vienmērīgi, kā arī pasargā svaru mehānismu no netīrumiem. Svēršanas procesā meža mašīnu operatoram 5 m pirms un pēc svaru platformas pa tehnoloģiskās brauktuves vidu ir novilkta sarkana lenta, lai forvarderu varētu savlaicīgi iztaisnot, lai mašīnas priekšējās un aizmugures daļas vidusasis veidotu taisnu līniju. Masa ar un bez kravas aprēķināta kā summa no viena reisa 4 svērumiem.

### 2.4.4. Celmu transportēšana uz starpkrautuvi

Celmu tālākam transportam darba laika patēriņš uzskaitīts sadalījumā pa kravām, fiksējot darba sākuma un beigu laiku. Savukārt laiks, kurš nav saistīts ar tiešo darbu veikšanu, no aprēķiniem izslēgts. Pētījumā izmantotie automobiļi ir Scania R480 un Scania R500. To būtiskākie tehniskie parametri: Scania R480 – dzinēja jauda 353kW, pašmasa 8935 kg; Scania R500 – dzinēja jauda 368 kW, pašmasa 17940 kg.

### 2.4.5. Celmu drupināšana

Celmu drupināšanas ražīguma aprēķināšanai darba laika uzskaitē izdalīti 7 darba elementi (2.8. tabula).

2.8. tabula. Drupināšanas darba laika sadalījums

Nr.	Darba laika elements	Paskaidrojums
1.	Sniedzas	Sniegšanās pēc materiāla.
2.	Satveršana	Materiāla satveršana.
3.	Ielikšana	Materiāla ielikšana drupinātājā.
4.	Kārto	Drupināmā materiāla kārtošana.
5.	Citas darbības	Citas ar darbu saistītas darbības.
6.	Pārējās darbības	Ar darbu nesaistītas darbības.
7.	Gaidīšana	Laiks, kad operators sakārto materiālu, piestumj vai gaida uz drupinātāju, kad būs iespējams iekraut nākamo celmu

Avots: autora veidots

Pētījumā izmantotās mašīnas ir CBI Magnum Force 6800P, Shredder DW 2060 un drupinātās koksnes sijātājs Doppstadt 441SM.

Svarīgākie tehniskie parametri: CBI Magnum Force 6800P dzinēja jauda 787 kW, kopējā masa 38000 kg; Shredder DW 2060 dzinēja jauda 150 kW, kopējā masa 15000 kg.

Lai samazinātu minerālaugšnes daudzumu celmu šķeldās, izmanto sijātāju Doppstadt 441SM ar sijāšanas ražīgumu līdz 70 ber.m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. Sijātāja izmantošana nav obligāta.

Produktīvajā darba laika aprēķinā iekļauti visi darba elementi, izņemot *Pārējās darbības*.

### 2.4.6. Drupinātās energokoksnes tālākais transports

Drupinātās koksnes tālākajā transportā izmanto autovilciena sastāvu, pārvietojot materiālu (sadrupināto celmu koksni) no starpkrautuves līdz gala patērētājam. Viens no pētījumā izmantotajiem autovilcieniem sastāv no 2007. gadā ražota Volvo FM vilcēja un puspiekabes ar ietilpību 90 ber.m<sup>3</sup>, otrs ir autovilciens Scania R480 ar diviem konteineriem, kur katra tilpums ir 45 ber.m<sup>3</sup>, bet trešais – 2012. gadā ražots Scania R500 autovilciens ar puspiekabi (ietilpība 90 ber.m<sup>3</sup>). Darba laika uzskaitē veikta, iekraušanas un izkraušanas darbam fiksējot sākuma un beigu laiku. Energokoksnes iekraušanai autotransportā izmantots Volvo L90C frontālais iekrāvējs (darba laika uzskaitē papildus nav veikta).

### 2.4.7. Energoatēriņa uzskaitē

Kopējā drupinātās koksnes izstrādes tehnoloģiskajā procesā energopatēriņa uzskaitē un analīze veikta sadalījumā pa darba operācijām, no kurām tālākā procesā izvēlēta visefektīvākā, to pamatojot ar pētījumā veiktajiem aprēķiniem. Katra no daļām analizēta atsevišķi, to sadalot pa darba operācijām un tehnikas vienībām; modelējot enerģijas izlietojumu celmu raušanā un pievešanā līdz augšgala krautuvei (AGK), kopumā izdalot 6 variantus, noskaidrots variants, kurā enerģijas izlietojums ir vismazākais.

Lai aprēķinātu kopējo energoresursu ietilpību un kopējo iespējamo enerģijas atdevi, pētījumā izmantots vienādojums, kur kopējā energobilance (EROEI) norāda uz atgūstamo enerģiju, ko varam saņemt pēc kopējās pievadāmās enerģijas (Wasiak, 2018).



$$EROEI = \frac{E_{nogatāts}}{E_{ieguldīts}} \quad (19)$$

$E_{nogatāts}$  tiek aprēķināts, balstoties uz celmu energoietilpības zemāko siltumspēju. Iegūtās celmu energokoksnes siltumspēja aprēķināta, analizējot apstrādātos paraugus pie sadarbības partnera SIA “Meža un koksnes produktu pētniecības un attīstības institūts”.

$$H_{net} = \frac{\left(\frac{x_3}{1-x_4}\right) \times (19,2 \times (1-x_5) \times (1-x_4) - 2,44 \times x_4)}{3.6} \quad (20)$$

kur:

$H_{net}$  – zemākā siltumspēja,  $MWh\ m^{-3}$ ;

$x_3$  – koksnes blīvums,  $t\ m^{-3}$ ;

$x_4$  – mitruma saturs, %;

$x_5$  – pelnu saturs, %.

Savukārt  $E_{ieguldīts}$  ir kopējā tehnoloģiskajam procesam pievadītā enerģija celmu drupinātās koksnes ražošanā procesā.

$$E_{ieguldīts} = \sum L_u * 9.88 \quad (21)$$

Enerģijas patēriņš stundā ( $L_u$ ) tiek pārvērsts enerģijas patēriņā uz vienu kubikmetru, ievērtējot darba ražīgumu un izmantojot formulas (Henning, 2001; Zimelis et al., 2018).

$$L_u = \frac{L_h}{PT} \quad (22)$$

$$PT = \frac{60}{T_0} \quad (23)$$

kur:

$L_h$  – degvielas patēriņš,  $L\ h^{-1}$ ;

$PT$  – darba ražīgums,  $m^3\ h^{-1}$ ;

$T_0$  – patērētais laiks,  $min\ m^{-3}$ .

Patērēto fosilo kurināmo uzskaitē veikta divos veidos: degvielas patēriņu aprēķinot un veicot tā uzskaiti pētījuma laikā.

Tehnikas vienībām, kuras pētījumā iesaistītas uz īsu laiku vai arī kurām nav iespējams uzstādīt alternatīvus degvielas skaitītājus, veikti matemātiskie aprēķini, balstoties uz Lofflera izstrādāto vienādojumu (Henning, 2001):

$$L_h = \frac{L_{hp} \times P_{hp} \times F_c}{W} \quad (24)$$

kur:

$L_h$  – degvielas patēriņš  $l\ h^{-1}$ ;

$L_{hp}$  – degvielas patēriņa apjoms, lai attīstītu 1 hp (zirgspēku) jaudas, ( $0.17\ kg^{-hp\ h}$ );

$P_{hp}$  – dzinēja jauda, hp;

$F_c$  – slodzes faktors, traktortehnika:  $F_c = 0.54$ , automobiļi:  $F_c = 0.38$ ;

$W$  – 1 litra degvielas masa; (dīzeļdegviela:  $W = 0.84\ kg\ l^{-1}$ ).

Otrā metode paredz šo resursu uzmērīšanu. Degvielas patēriņa uzskaitē veikta:

1. Degvielas patēriņu nosaka, veicot uzpildi darba dienas sākumā un beigās, izmantojot uzpildes pistoli. Pirms uzpildes mašīnai jānostājas līdzienā vietā, kura tiek marķēta (iezīmēta ar krāsu). Tālākā procesā mašīnas degvielas tilpne tiek uzpildīta, līdz tā ir pilna. Par pilnu degvielas tvertni uzskata, kad ielietā dīzeļdegviela ir 1 cm zem korķa uzskrūvēšanas vietas. Nākamais degvielas mērījums paredzēts darba dienas beigās,

mašīnai nostājoties tieši tajā pašā vietā, kur iepriekšējās uzpildes brīdī, uzpilde tiek atkārtota, līdz degvielas tvertne ir pilna. Darba dienas beigās ielietais degvielas daudzums uzskatāms par precīzāko degvielas patēriņa mērīšanas paņēmieni tiešo darbu izpildē. Lai precīzāk uzskaitītu izlietoto degvielas daudzumu, pētījuma laikā ievērots, ka dzinējs ir jāizslēdz, ja operators atpūšas ilgāk nekā 5 min.

2. Degvielas uzskaitēi izmantota iekārta AIC-904 VERITAS (2.9. tabula), kura tehnikai uzstādītā aiz degvielas filtra. Degvielas patēriņa uzskaitē šajā gadījumā pamatojas uz impulsu skaitu (200 ppl = 1 l), tādejādi iespējams precīzi uzmērīt patērēto degvielas daudzumu, izsakot to kā patēriņu stundā vai uz saražotā produkta vienību.

2.9. tabula. **Degvielas uzskaites sistēmas AIC-904 tehniskie parametri**

Sadaļas	Rādītājs	Raksturojums
Tehniskie dati	Izmēri (ar filtru)	280 × 100 × 160 mm
	Masa (ar filtru)	2.5 kg
Pielietotie materiāli	Plūsmas sensora materiāls	misiņš, alumīnijs
	Blīvējuma materiāls	Viton®
	Savienojumu materiāls	tērauda aizsardzība TAAC3, nerūsējošais tērauds, anodizēts tērauds
	Stiprinājuma skavas materiāls	nerūsējošais tērauds
	Apvalka materiāls	anodizēts alumīnijs
Plūsmas mērītājs	Plūsmas mērītājs	dzinējiem ar jaudu līdz 220 kW
	Plūsmas mērīšanas princips	vienvirziena, tilpuma metode, kustīgs ekscentriskis rotors, mikroprocesora vadīts impulsu ģenerators
	Plūsmas mērītāja mērīšanas diapazons	1–80 L h <sup>-1</sup>
	Plūsmas mērītāja precizitāte	vismaz 1%
	Plūsmas mērītāja rezultātu atkārtojamība	vismaz 0.2%
	Plūsmas mērītāja pieļaujamais spiediens	1 līdz 6 bāri
	Plūsmas mērītāja uzstādīšanas pozīcija	vertikāla
Elektrības pieslēgums	Barošanas spriegums	6-30 V, līdzstrāva
	Impulsu ģenerators signāls	taisnstūra, cikls 50 %
	Plūsmas mērītāja impulsu intervāls vienam litram	200 ppl
Papildus aprīkojums	Papildus aprīkojums	Degvielas atplūdes dzeses radiators APS120; datu pārvades un barošanas kabelis; GPS/GSM ierīce FM4200

Avots: autora veidots

Kopumā pētījumā realizētā degvielas uzskaite atkarībā no uzskaites metodes (2.10. tabula) nepieciešama, lai nepieciešamības gadījumā aprēķinātos pētījuma rezultātus būtu iespējams validēt.

2.10. tabula. Fosila kurināmā uzskaites sadalījums

Operācijā	Tehnikas nosaukums	Degvielas patēriņš aprēķināts projekta ietvaros	Degvielas patēriņš pēc aprēķiniem (Henning, 2001)
Celmu raušana	Komatsu PC210LC	X	-
	New Holand E215B	X	-
Pievešana	JD 810D	X	-
	Ponsse Gazelle	X	-
	Logset 4F	-	X
Transports uz starpkrautuvi	Scania R480	-	X
	Scania R 500	-	X
Drupināšana	CBI Magnum Force 6800P	-	X
	Shredder DW 2060	-	X
	Doppstadt 441SM	-	X
Transports līdz gala patērētājam	Volvo L90C	-	X
	Scania 380	-	X
	Scania 420	-	X
	Scania R 500	-	X
	Volvo FM	-	X

Avots: autora veidots

Piezīme: ar X apzīmētas tabulas šūnas, kurās degvielas patēriņš noteikts balstoties uz degvielas skaitītāju vai aprēķinās pēc formulas.

Lietderības koeficientu aprēķina, salīdzinot enerģiju, kuru iespējams iegūt ( $E_{out}$ ), sadedzinot kurināmo, to attiecinot pret kopējo patērējamās enerģijas daudzumu ( $E_{in}$ ). Ja mazākā vērtība  $E_{out}$  ir vienāda ar 0, tad lietderības koeficients arī ir 0.

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (25)$$

## 2.5. Datu apstrāde

Datu matemātiskai analīzei uzmērīto celmu caurmērs un iegūtie ražīguma rādītāji pārbaudīti attiecībā uz atbilstību normālajam sadalījumam, izmantojot programmu paketi Shapiro-Wilk "Normality test".

Izlases vidējā standartklūda raksturo atsevišķu vidējo aritmētisko izkliedi ap ģenerālkopas vidējo:

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (26)$$

Lai raksturotu datu reprezentativitātes novērtējumu atkarībā no izkliedes vidējās standartklūdas lieluma, izmanto aprakstošās statistikas rādītāju – izkliedes vidējo relatīvo standartklūdu:

$$s_{x\%} = \frac{s_{\bar{x}}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (27)$$

Uzmērīto celmu caurmēra un augstuma raksturošanai izmanto Kvartiles metodi. Lai noteiktu, vai ir būtiskas atšķirības starp dažādiem celmu izstrādes tehnoloģijas procesā pētītajām vienībām, izmanto vienfaktora dispersijas analīzi (ANOVA-testu).

### 3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

Nodaļā atspoguļotā informācija ietver iegūto rezultātu aprakstu attiecībā uz promocijas darbā izvirzīto mērķi un pētnieciskajiem uzdevumiem. Nodaļas izklāsts veidots, sākot ar potenciāli un tehniski pieejamo celmu apjomu, izstrādes metožu novērtēšanas rezultātiem, kā arī tehnisko prasību ievērošanas izklāstu, pildot darba uzdevumus. Nodaļas noslēgumā aprakstīts celmu izstrādes un transportēšanas energoefektivitātes paaugstināšanas tehnoloģiskais risinājums, kurā kā rezultējošais rādītājs ir lietderības koeficients, kurš izteikts kā enerģijas daudzuma, kas iegūstams no celmiem attiecība pret kopējā tehnoloģiskajās operācijās patērēto fosilo kurināmo.

#### 3.1. Celmu resursu pieejamība Latvijā

Kopējie teorētiski pieejamie celmu koksnes energoresursi atbilst 142 TWh primārās enerģijas, no kuriem daļa, atbilstoši saimnieciskās darbības ierobežojumu pazīmēm (Tabula 3.1.), ir saimnieciski nepieejamos mežos. Lielāko daļu teorētiski pieejamo celmu biomasas resursu veido priede (45%), egļe (36%), bērzs (15%) un apse (4%). Summējot meža tipus, kuros celmu koksnes ieguve nav rekomendējama, kā arī mežus, kuros ir sezonāli izstrādes ierobežojumi, 35% platību celmu raušanu nevar veikt.

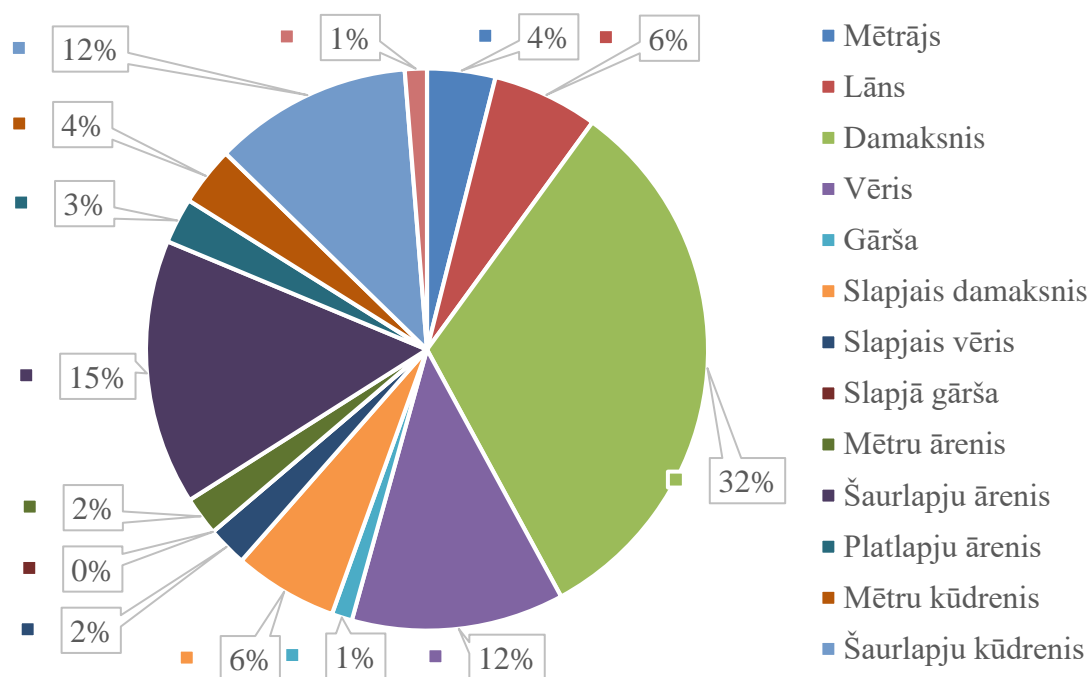
3.1. tabula. **Kopējie celmu koksnes biomasas resursi**

Aizsardzības pazīme	tūkst.t saunas					Kopā, GWh primārās enerģijas
	Priede	Egļe	Bērzs	Apse	Kopā	
Aizliegta mežsaimnieciskā darbība	446	295	137	53	930	7786
Aizliegta galvenā cirte un kopšanas cirte	405	223	160	63	852	7129
Aizliegta galvenā cirte	149	41	20	7	217	1816
Aizliegta kailcirte	739	465	134	30	1368	11453
Sezonāli saimnieciskās darbības aizliegumi	176	35	4	0	215	1799
Nav saimnieciskās darbības aizliegumu	5741	4971	2137	549	13398	112162

Avots: autora veidots

Latvijas meža tipoloģijā izdalīti 23 meža tipi (Bušs, 1981; Liepa et al. 2014), no kuriem celmu raušana iespējama saimnieciski piemērojamajos mežos ar auglīgām augsnēm (Lazdiņš et al., 2014), līdz ar to būtiski samazinās potenciālais resursu apjoms. Papildus nepieciešams izvērtēt iegūstamās celmu koksnes pieejamību atbilstoši katlumāju izvietojuma tīklam, pievešanas un izvešanas attālumu, lai noskaidrotu, kur celmu ieguve nav rentabla. Darbā

aprēķināto, uz teorētiski pieejamajām audzēm un tipiēm balstīto celmu resursu lielāko daļu veido sausieņi un āreņi (3.1. att.).



Avots: autora veidots

### 3.1. att. Celmu koksnes ieguves apjomi sadalījumā pa meža tipiēm

Potenciāli pieejamais celmu koksnes apjoms atbilst 103 TWh primārās enerģijas, kur lielākā iegūstamā biomasa (55%) ir sausieņu meža tipos (Tabula 3.2.). Lielākā daļa potenciāli pieejamo resursu ir valsts mežos – 68%. Privātpersonu un uzņēmumu īpašumā ir 32% platību.

3.2. tabula. Potenciāli pieejamais celmu biokurināmā apjoms

Meža tips	tūkst.t saunas					Kopā, GWh primārās enerģijas
	Priede	Egle	Bērzs	Apse	Kopā	
Mētrājs	470	8	7	0	485	4057
Lāns	627	102	23	0	751	6290
Damaksnis	1695	1577	561	124	3956	33119
Vēris	88	851	355	215	1509	12634
Gārša	0	58	65	22	146	1219
Slapjais damaksnis	324	298	95	21	738	6176

3.2. tabulas turpinājums

Meža tips	tūkst.t saunas					Kopā, GWh primārās enerģijas
	Priede	Egle	Bērzs	Apse	Kopā	
Slapjais vēris	33	163	76	12	284	2377
Mētru ārenis	0	0	0	0	0	2308
Šaurlapju ārenis	167	69	32	8	276	15782
Platlapju ārenis	741	753	313	78	1885	2702
Mētru kūdrenis	3	150	128	42	323	3499
Šaurlapju kūdrenis	309	63	45	1	418	11818
Platlapju kūdrenis	575	611	208	17	1412	1311

Avots: autora veidots

Tehniski pieejamais ikgadējais celmu koksnes apjoms, 349 GWh primārās enerģijas. Atbilstoši CSP datiem apkopojumā “Katlumājās patērētais kurināmais un saražotā siltumenerģija, TJ”, 2018. gadā bija nepieciešami 7690 TJ kurināmās šķeldas katlumāju darbības nodrošināšanai, izmantojot celmu drupināto koksni kā vienu no izejvielām, un tā nodrošinot 16.3% no kopēji nepieciešamā patēriņa.

### 3.2. Ražīguma analīze celmu koksnes sagatavošanas tehnoloģiskajā procesā

#### 3.2.1. Pētījumu objektu raksturojums

Platībās, kurās plānots veikt celmu raušanu-plēšanu, kopumā uzmērīti 3022 celmi (Tabula 3.3.). Plānotai izstrādei ar CBI iekārtu uzmērīti 35% no kopējā celmu skaita un 65% – ar MCR 500. Vidējais celma caurmērs platībās, kur izstrāde veikta ar CBI, ir  $33.5 \pm 0.4$  cm, vidējais augstums  $26.5 \pm 0.4$  cm. Savukārt platībās, kur darbojās MCR 500, vidējais celma caurmērs bija  $33.6 \pm 0.2$  cm, bet vidējais augstums -  $33.1 \pm 0.4$  cm. Marķēto celmu raksturojums sagatavots, balstoties uz mērījuma datiem, kuri ievākti pirms celmu izstrādes. No visiem uzmērītajiem celmiem skuju koki ir 75% no kopējā biomasas (egle 59% un priede 16%).

3.3. tabula. Pētījuma objektu apskats

Iekārta	ID	Rādītājs	Koku suga			
			Apse	Bērzs	Egle	Priede
CBI	177	Celmu skaits, gab.	8	43	134	55
		Celmu $D_{vid}$ , cm	$41.1 \pm 5.1$	$34.5 \pm 1.3$	$33.8 \pm 0.9$	$39.1 \pm 1.4$
		Celmu $H_{vid}$ , cm	$11.9 \pm 4.8$	$17.9 \pm 1.6$	$17.0 \pm 0.8$	$14.7 \pm 1.0$

## 3.3. tabulas turpinājums

Iekārta	ID	Rādītājs	Koku suga				
			Apse	Bērzs	Egle	Priede	
CBI	177	Tehniski pieejamais biomasas apjoms, kg <sub>sausnas</sub>	747	2257	10519	5816	
		Tehnoloģiski pieejamais biomasas apjoms, kg <sub>sausnas</sub>	463	1399	6522	3606	
	188	Celmu skaits, gab.	-	-	192	69	
		Celmu D <sub>vid</sub> , cm	-	-	25.0±0.6	28.4±0.7	
		Celmu H <sub>vid</sub> , cm	-	-	34.5±0.5	34.7±1.0	
		Tehniski pieejamais biomasas apjoms, kg <sub>sausnas</sub>	-	-	7979	3436	
		Tehnoloģiski pieejamais biomasas apjoms, kg <sub>sausnas</sub>	-	-	4947	2130	
	CBI	326	Celmu skaits, gab.	-	-	311	12
			Celmu D <sub>vid</sub> , cm	-	-	36.4±0.7	39.0±2.8
			Celmu H <sub>vid</sub> , cm	-	-	25.1±0.6	20.0±2.2
Tehniski pieejamais biomasas apjoms, kg <sub>sausnas</sub>			-	-	29840	1292	
Tehnoloģiski pieejamais biomasas apjoms, kg <sub>sausnas</sub>			-	-	18501	801	
437		Celmu skaits, gab.	-	-	156	78	
		Celmu D <sub>vid</sub> , cm	-	-	33.5±1.9	40.2±0.8	
		Celmu H <sub>vid</sub> , cm	-	-	30.2±0.8	29.0±0.9	
		Tehniski pieejamais biomasas apjoms, kg <sub>sausnas</sub>	-	-	13769	8911	
		Tehnoloģiski pieejamais biomasas apjoms, kg <sub>sausnas</sub>	-	-	8537	5525	
MCR 500	98	Celmu skaits, gab.	12	108	470	144	
		Celmu D <sub>vid</sub> , cm	52.5±2.7	38.0±1.0	35.0±0.5	36.0±0.6	



3.3. tabulas turpinājums

Iekārta	ID	Rādītājs	Koku suga				
			Apse	Bērzs	Egle	Priede	
MCR 500	98	Celmu $H_{vid}$ , cm	53.8±6.2	34.9±0.9	36.3±1.1	29.1±0.7	
		Tehniski pieejamais biomasas apjoms, $kg_{sausnas}$	2254	8477	41963	12827	
		Tehnoloģiski pieejamais biomasas apjoms, $kg_{sausnas}$	1398	5256	26017	7953	
	104	Celmu skaits, gab.	22	26	297	64	
		Celmu $D_{vid}$ , cm	39.9±2.0	30.5±1.8	32.0±0.5	34.4±0.8	
		Celmu $H_{vid}$ , cm	26.4±1.4	27.9±1.6	29.1±0.5	25.5±0.9	
		Tehniski pieejamais biomasas apjoms, $kg_{sausnas}$	1814	1136	20784	5008	
		Tehnoloģiski pieejamais biomasas apjoms, $kg_{sausnas}$	1125	704	12886	3105	
	MCR 500	176	Celmu skaits, gab.	-	8	168	285
			Celmu $D_{vid}$ , cm	-	25.1±1.5	27.1±0.5	32.9±0.4
Celmu $H_{vid}$ , cm			-	33.1±3.6	30.6±0.6	36.3±0.5	
Tehniski pieejamais biomasas apjoms, $kg_{sausnas}$			-	170	7742	20891	
Tehnoloģiski pieejamais biomasas apjoms, $kg_{sausnas}$			-	106	4800	12952	
MCR 500 II	58	Celmu skaits, gab.	-	-	158	-	
		Celmu $D_{vid}$ , cm	-	-	39.4±1.1	-	
		Celmu $H_{vid}$ , cm	-	-	0	-	
		Tehniski pieejamais biomasas apjoms, $kg_{sausnas}$	-	-	16648	-	
		Tehnoloģiski pieejamais biomasas apjoms, $kg_{sausnas}$	-	-	10322	-	
	360	Celmu skaits, gab.	-	-	186	16	
		Celmu $D_{vid}$ , cm	-	-	35.7±1.0	44.1±2.2	

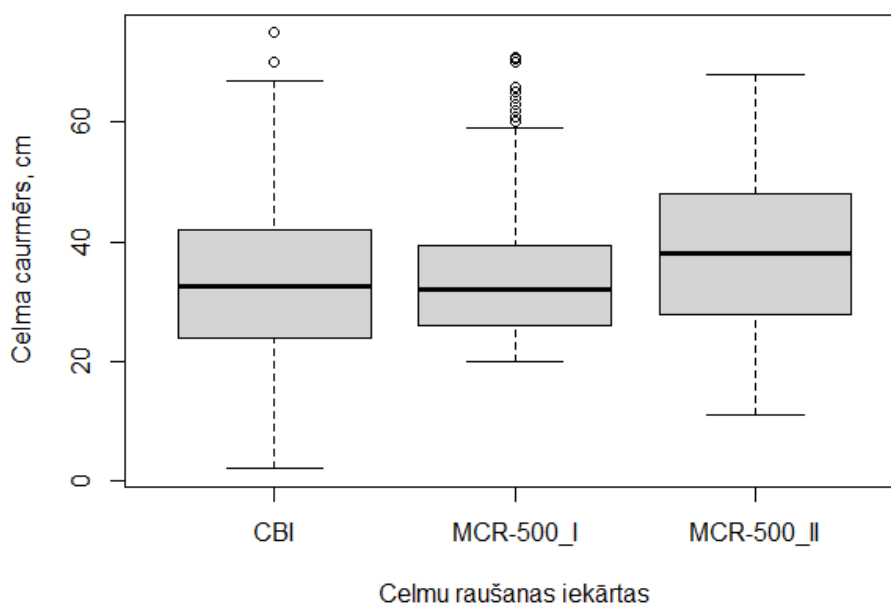
3.3. tabulas turpinājums

Iekārta	ID	Rādītājs	Koku suga			
			Apse	Bērzs	Egle	Priede
MCR 500 II	360	Celmu $H_{vid}$ , cm	-	-	0	0
		Tehniski pieejamais biomasas apjoms, $kg_{sausnas}$	-	-	16068	2021
		Tehnoloģiski pieejamais biomasas apjoms, $kg_{sausnas}$	-	-	9962	1253
Kopā	CBI	Celmu skaits, gab.	8	43	793	214
		Tehniski pieejamais biomasas apjoms, $kg_{sausnas}$	747	2257	62107	19456
		Tehnoloģiski pieejamais biomasas apjoms, $kg_{sausnas}$	463	1399	38506	12063
Kopā	MCR 500 I	Celmu skaits, gab.	34	142	935	493
		Tehniski pieejamais biomasas apjoms, $kg_{sausnas}$	4068	9783	70488	38726
		Tehnoloģiski pieejamais biomasas apjoms, $kg_{sausnas}$	2522	6066	43703	24010
	MCR 500 II	Celmu skaits, gab.	-	-	344	16
		Tehniski pieejamais biomasas apjoms, $kg_{sausnas}$	-	-	32716	2021
		Tehnoloģiski pieejamais biomasas apjoms, $kg_{sausnas}$	-	-	20284	1253

Avots: autora veidots

Raksturojot datu kopas lielumu, izmantojot vidējo relatīvo standartkļūdu, strādājot ar CBI iekārta, datu reprezentativitāte ir 1%, MCR 500 – 1% un MCR 500 II – 2%.

Salīdzinot platības, kuras plānots izstrādāt ar CBI, MCR 500 un MCR 500 II (3.2. att.), atšķirības celmu caurmēra atšķirības nav būtiskas, salīdzinot CBI ar MCR 500 ( $p = 0.09$ ); bet tās ir būtiskas, salīdzinot CBI ar MCR 500 II (ar MCR 500 II rauti lielāki celmi).



Avots: autora veidots

### 3.2. att. Celmu caurmēru mērījumu sadalījums darba galvu griezumā

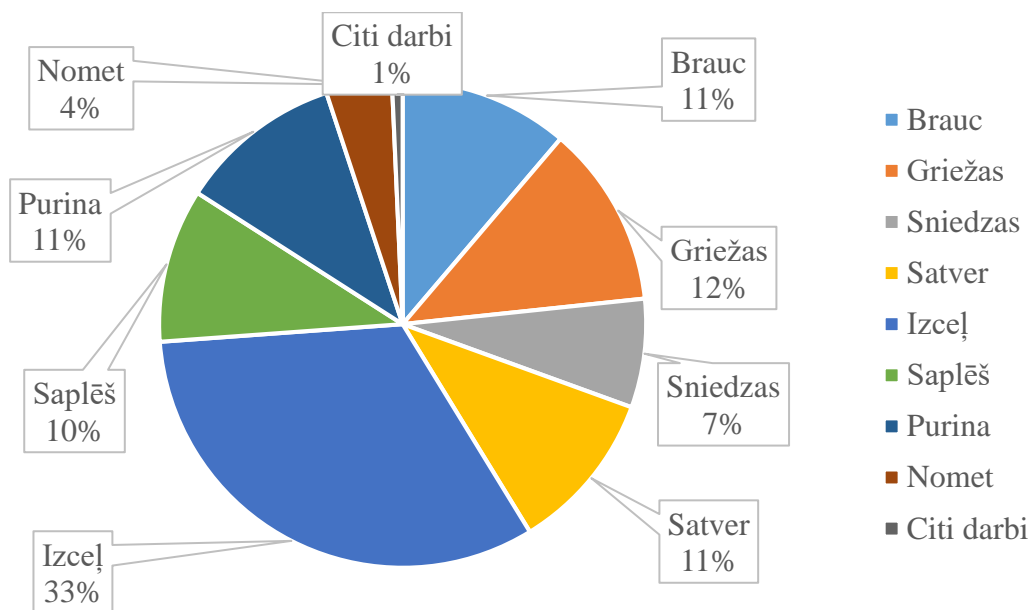
Uzmērot celmus atcelmošanai plānotajās platībās, iegūtā datu kopa analizēta, izmantojot Kvartiles metodi. Metode paredz datu kopu sadalīt 3 vienādās daļās, kur Q1 raksturo 25% no datu apjoma, tādejādi reprezentējot mazākās vērtības, Q2 raksturo 50% un Q3 75% raksturo lielākās vērtības. Platībās, kuras paredzētas darbam ar CBI celmu rāvēju, mazākais uzmērītais celms ir ar caurmēru 2 cm, 25% no uzmērītajiem celmiem – ar caurmēru līdz 24 cm, 50% – ar caurmēru līdz 32.5 cm, savukārt 75% – ar caurmēru līdz 42 cm. Lielākais uzmērītais celms ar CBI rāvēju ir ar caurmēru 75 cm. Ar MCR 500 iekārtu mazākā uzmērītā (marķētā) celma caurmērs ir 20 cm, 25% no uzmērītajiem celmiem caurmērs ir 26 cm, 50% caurmērs ir līdz 32 cm un 75% tas ir līdz 39.5 cm. Lielākais celma caurmērs ir 71 cm. Strādājot ar MCR 500 II, mazākā uzmērītā celma caurmērs ir 11 cm, 25% no uzmērītajiem celmiem caurmērs ir 28 cm, 50% – 38 cm, 75% – 48 cm, lielākā izrautā celma caurmērs ir 68 cm.

Pēc celmu raušanas veikta atkārtota celmu uzskaitē, fiksējot neizrautos celmus. Marķēto, bet neizrauto celmu skaits, strādājot ar CBI celmu rāvēju, ir 14%, ar MCR 500 – 10%, bet ar MCR 500 II – 23%. Platības atcelmošanā ar CBI un MCR 500 neizrauto celmu daudzums ir neliels. Tas skaidrojams ar minerālaugsnes nobiršanu no celma raušanas procesā, kā rezultātā operatoram atsevišķos gadījumos apgrūtināta nākamā celma identificēšana, jo marķējums nav redzams. Celmu atrašanu apgrūtinā arī sniegs. Zem sniega segas var redzēt tikai lielākos un vai augstākos celmus. Ražošanas apstākļos neizrauto celmu īpatsvars būs lielāks, jo vairāk celmu būs apbērti ar minerālaugsni vai tos nosegs mežizstrādes atliekas, ko izmēģinājumos no celmiem noņēma pētnieki. Tas nozīmē, ka celmu izstrādei vairāk piemērotas platības, kurās mežizstrādes atliekas ir izvestas vai ieklātas ceļos. Celmus var marķēt arī harvesteris, pilnveidojot kokmateriālu nogriežņu krāsošanas sistēmu, lai iekrāsotu arī celmus un lai operatoram būtu ērtāk orientēties celmu izvietojumā.

#### 3.2.2. Celmu izstrāde

Kopā pētījuma laikā izrauti 2720 celmi. Vidējā izrautā celma caurmērs, strādājot ar CBI raušanas iekārtu, ir  $33 \pm 11$  cm, ar MCR 500 –  $33 \pm 9$  un ar MCR 500 II –  $38 \pm 10$  cm. Vidējais laika patēriņš vienas  $t_{\text{sausnas}}$  sagatavošanai ir 0.3 h efektīvā darba laika. Celmu raušanas procesā

lielākais laika patēriņš ir celmu izraušanai no augsnes. Tam jāpatērē 33% no kopējā laika (3.3. att.). Mazāk laika aizņem griešanās ar ekskavatoru (12%), ekskavatora pārvietošanās (11%), celma saplēšana (11%), minerālaugsnes nopurināšana (11%) un celma satveršana (10%).



Avots: autora veidots

### 3.3. att. Produktīvā darba laika sadalījums celmu raušanā

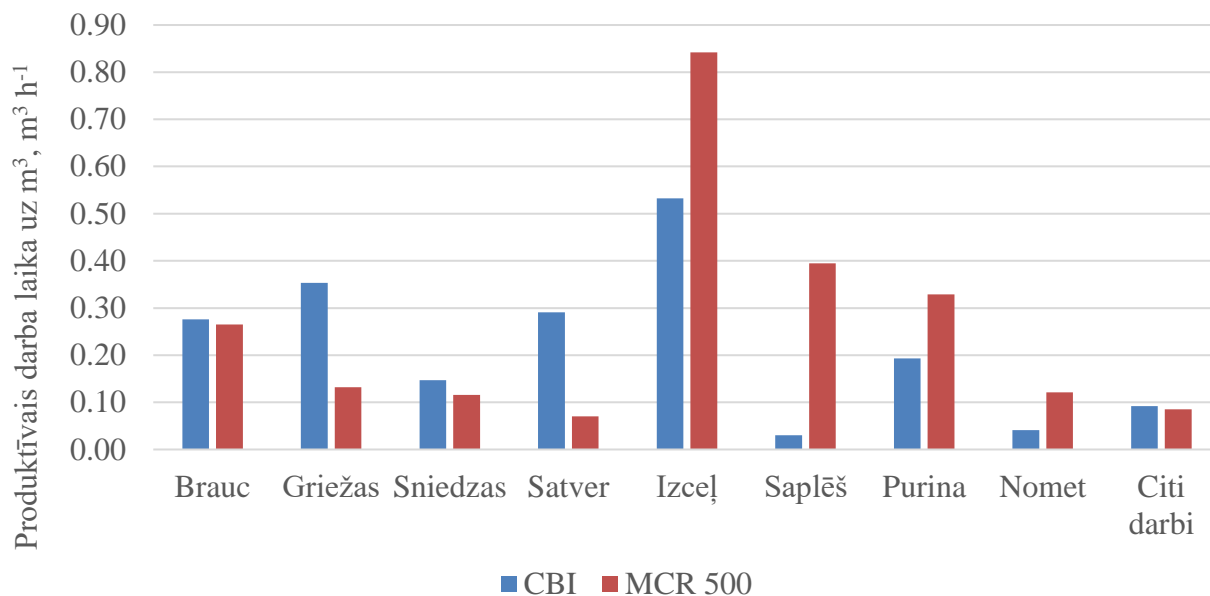
Atbilstoši produktīvā darba laika patēriņam izmēģinājumos, aprēķinātie rādītāji būtiski atšķiras ( $p = 0.01$ ) atkarībā no izstrādātās metodes. Tas skaidrojams ar efektivitātes uzlabošanu darba procesā, tādējādi samazinot nepieciešamo laika patēriņu tāda daudzuma celmu izraušanai, no kura var iegūt vienu  $t_{sausnas}$  (Tabula 3.4.). Strādājot ar CBI, 1  $t_{sausnas}$  sagatavošana aizņem 0.19 h, savukārt, strādājot ar MCR 500 - 0.34 h. Iegūtajiem datiem piešķirt vispārinošu nozīmi nebūtu korekti, jo MCR 500 pirmajā izmēģinājumu posmā (2. Darba metode) ekskavatora hidrosūknis nenodrošināja nepieciešamo eļļas plūsmu un pretnazis faktiski nebija izmantojams celmu plēšanai. Pēc tehniskiem uzlabojumiem un 2. metodes pilnveidošanas ražīguma rādītāji palielinājās līdz  $0.19 t_{sausnas} h^{-1}$ , kas atbilst ar CBI iegūtajiem rādītājiem. Jāņem vērā arī tas, ka šī pētījuma laikā tehnikai tika veikti remontu, lai nodrošinātu nominālo eļļas plūsmu. Tālākos aprēķinos darba ražīgums netiek modelēts pie dažādiem tehniskās gatavības līmeņiem.

3.4. tabula. Produktīvā darba laika patēriņa sadalījums pa elementiem, min  $t_{sausnu}$

Iekārta	Celma vidējais caurmērs, cm	Cirsmas ID	Brauc	Griežas	Smiedzas	Satver	Izceļ	Saplēš	Purina	Nomet	Citi darbi	Celmu koksnes iegūtā biomasa, kg	Kopējais darba laiks, h $t^{-1}$	Produktīvais darba laiks, h $t^{-1}$	Ražīgums, $m^3 h^{-1}$	Tehnikas izmantošanas koeficients
CBI	26.36±0.52	188	0.20	0.35	0.15	0.23	0.35	0.09	0.21	0.04	0.02	8850	0.27	0.27	10.59	99%
	36.46±0.59	326	0.18	0.19	0.11	0.16	0.33	0.04	0.14	0.04	0.03	21873	0.20	0.20	14.47	97%
	36.75±1.12	437	0.17	0.21	0.09	0.18	0.32	0.02	0.12	0.02	0.06	10661	0.20	0.19	15.27	95%
MCR 500	35.26±0.46	98	0.19	0.09	0.08	0.05	0.59	0.28	0.23	0.08	0.09	43089	0.35	0.34	8.48	97%
	31.99±0.60	104	0.12	0.06	0.08	0.05	0.37	0.33	0.43	0.02	0.07	14653	0.39	0.38	7.45	99%
	30.18±0.34	176	0.27	0.20	0.14	0.09	0.77	0.33	0.23	0.14	0.05	23135	0.42	0.41	6.90	99%
MCR 500 II	39.51±1.21	58	0.12	0.11	0.09	0.15	0.45	0.05	0.08	0.05	0.02	13145	0.19	0.19	15.39	98%
	36.16±0.99	360	0.13	0.22	0.11	0.26	0.52	0.18	0.08	0.08	0.07	14012	0.28	0.26	10.82	96%

Avots: autora veidots

Izmēģinājumu laikā sasniegtais vidējais ražīgums, strādājot ar CBI iekārtu, ir  $13.6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , savukārt ar MCR 500 -  $7.8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . Salīdzinot darba laika patēriņu, sadalījumā pa darba elementiem (3.4. att.), sliktāki rādītāji (darba laika patēriņa pieaugums ar negatīvu zīmi), salīdzinot abas iekārtas, ir celmu izceļšanai  $-69\%$ , saplēšanai  $-533\%$ , celma purināšanai  $-67\%$ , celmu nomešanai  $-137\%$ . Šīm operācijām papildus patērētais laiks saistīts ar ekskavatora hidrosistēmas problēmām, kas neļāva pilnvērtīgi izmantot pretnazi celmu plēšanai un satveršanai.



Avots: autora veidots

### 3.4. att. Produktīvā darba laika patēriņš sadalījumā pa elementiem

Lai uzlabotu ražīguma rādītājus, celmu raušanas-plēšanas tehnoloģiskajā risinājumā veikta virkne uzlabojumu (3.5. att.):

- pazemināts cilindra stiprinājums; kā rezultātā, samazinot pleca garumu, saskaņā ar teorētiskās mehāniskās aprēķiniem uzlabojas pretnaža efektivitāte un ātrdarbība, kas būtiski ietekmē ražīguma rādītājus;
- palielināta konstrukcijas izturība pret sānsplēdi, kā rezultātā uzlabojas iekārtas tehniskā gatavība, tādējādi samazinot dīkstāves remontu laikā, mainot pretnaža pirksta bukses;
- palielināts hidropievadu šķērsriezums, kā rezultātā iekārtu var pieslēgt lieljaudas hidropievada, samazinot eļļas plūsmas pretestību sistēmā, kā rezultātā cilindrs var darboties ātrāk;
- virkne uzlabojumu saistīta ar augsnes gatavošanas moduli, palielinot tā virsmas laukumu un sānu malu liekumu, kā rezultātā uzlabojas produktivitāte un darb izpildes kvalitāte.

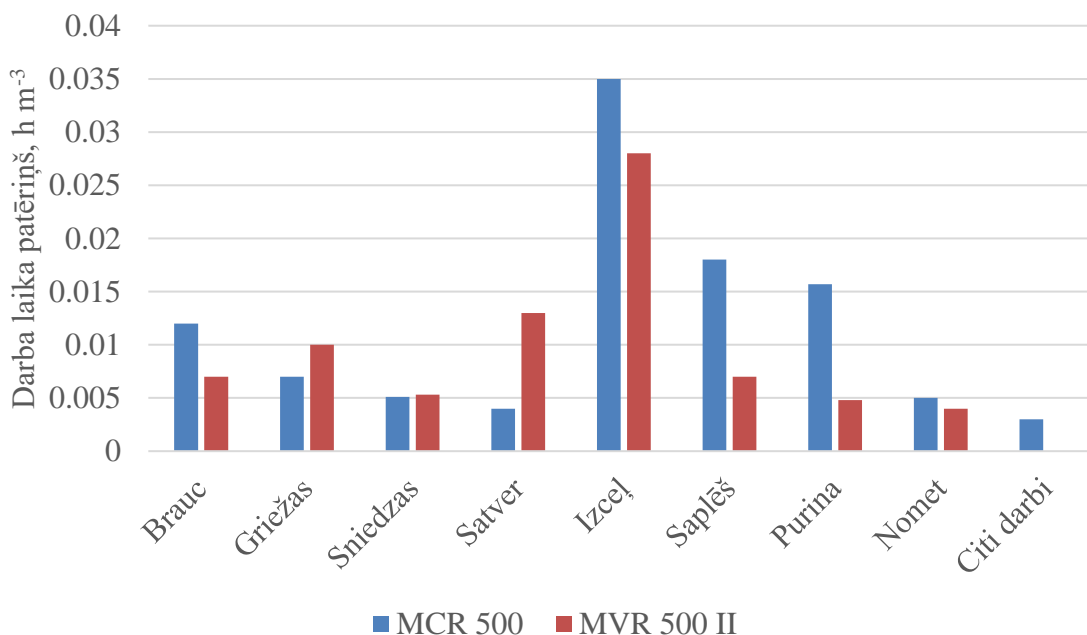


- Pazemināts cilindra stiprinājums
- Palielināta konstrukcijas izturība pret sānspiedi
- Augsnes gatavošanas agregāta sānos izgrieztas atveres tīrīšanai
- Palielināta augsnes gatavošanas agregāta virsma
- Samazināts iekšējās plātnes izliekuma leņķis
- Palielināts hidropievadu šķērsriezums

Avots: autora veidots

### 3.5. att. Uzlabojumi celma raušanas galvai MCR 500 II

Pēc iekārtas tehniskiem un tehnoloģiskiem uzlabojumiem izmēģinājumos konstatēts, ka MCR 500 salīdzinot ar MCR 500 II, būtiski samazinājies darba laika patēriņš, pārrēķinot uz saražotās produkcijas vienību (3.6. att.). Vidējais ražīgums, strādājot ar MCR 500 II iekārtu bez augsnes gatavošanas, ir  $13.1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , bet ar papildus gatavojot augsni –  $11.1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . Piemēram, celmu izcelšana uzlabojusies par 23%, celmu saplēšana – par 164%, celmu purināšana – par 216%, bet summārais ražīguma uzlabojums ir 59%.



Avots: autora veidots

### 3.6. att. Produktīvā darba laika patēriņš pēc iekārtas uzlabojumiem

Analizējot iegūtos datus sadalījumā pa celmu caurmēru grupām (3.5. tabula), darba laika patēriņa izmaiņas celmu izcelšanā no zemes pēc veiktajiem konstrukcijas uzlabojumiem nav būtiskas ( $p = 0.64$ ). Bet celmu saplēšanas vairākās daļās ražīgums ir būtiski ( $p = 0.05$ ) uzlabojies. Celmu 2. grupā uzlabojums ir 18%, 3. grupā – 34%, 4. grupā – 50% un 5. grupā – 69%. Lielākās izmaiņas ir celmu grupās, kurās ietilpst lielas dimensijas celmi. Darba laika patēriņš celmu purināšanai ir samazinājies, bet atšķirība nav statistiski būtiska ( $p = 0.64$ ).

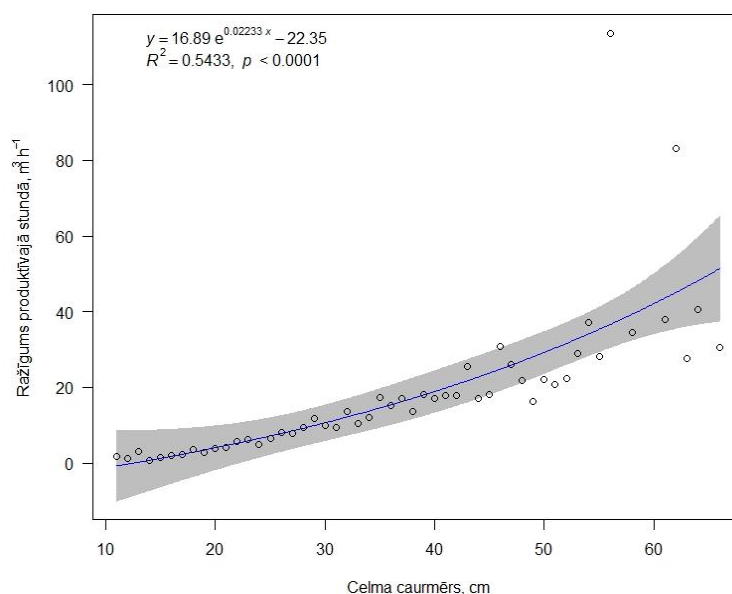
Līdzīgi ir arī ar celmu nomešanu, lai samazinātu minerālaugšnes piemaisījumus; ražīguma rādītāju izmaiņas konstatētas celmu grupās ar caurmēru lielāku nekā 20 cm, bet tās nav statistiski būtiskas ( $p = 0.58$ ).

3.5. tabula. Ražīguma rādītāji pēc veiktajiem uzlabojumiem sadalījumā pa darba elementiem,  $m^3 h^{-1}$

Iekārta	Celmu grupa	Izceļ	Saplēš	Purina	Nomet
MCR-500	2	4.90	2.30	1.63	1.19
	3	4.04	1.85	1.98	0.70
	4	3.30	1.74	1.65	0.55
	5	3.41	1.74	1.25	0.39
MCR-500_II	2	5.10	1.89	3.20	2.33
	3	6.70	1.23	1.05	0.81
	4	3.91	0.86	0.61	0.57
	5	1.99	0.54	0.36	0.27

Avots: autora veidots

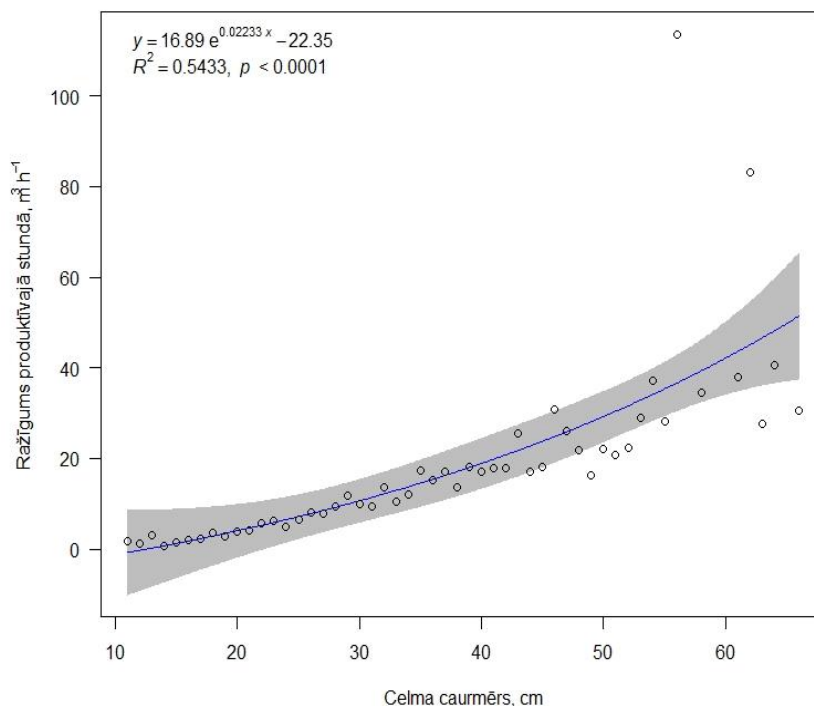
Strādājot ar CBI (3.7. att.) un MCR 500 II (3.8. att.), sasniegtie ražīguma rādītāji ir līdzīgi ( $p = 0.16$ ). Salīdzinot celmu raušanas ražīguma rādītājus ar līdzīgiem pētījumiem Ziemeļvalstīs, kuros salīdzinātas dažādus celmu raušanas kausus, konstatēts, ka Latvijā iegūti būtiski labāki ražīguma rādītāji. Ziemeļvalstīs dažādos pētījumos ražība bija vidēji  $7-10 m^3 h^{-1}$ . (Laitila et al., 2008; Athanassiadis et al., 2011; Moffat et al., 2011; Palander et al., 2015; Kärhä & Mutikainen, n.d.). Jāņem vērā, ka salīdzinātie rādītāji ir indikatīvi, jo pastāv būtiskas atšķirības, ko nosaka augsnes tips un raujamo celmu dimensijas. Latvijā veiktajos izmēģinājumos celmi ir būtiski lielāki un izstrāde veikta galvenokārt minerālaugsnēs, bet salīdzinājumā ietvertajos Ziemeļvalstu pētījumos informācija ir par kūdras augsnēm.



Avots: autora veidots

3.7. att. Ražīgums produktīvajā stundā, strādājot ar CBI,  $m^3 h^{-1}$





Avots: autora veidots

### 3.8. att. Ražīgums produktīvajā stundā, strādājot ar MCR 500 II, m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>

Platību atcelmošanas plānošanas procesā, izsniedzot darba uzdevumu potenciālajam pakalpojuma sniedzējam, jāņem vērā darba laika patēriņš un iegūstāmās biomasas daudzums. Saskaņā ar pētījumā iegūtiem datiem rekomendējama minimālā raujamo celmu caurmērs ir 20 cm (Lazdiņš et al., 2014). Mazākus celmus ir jārauj tad, ja atcelmošanas mērķis ir, piemēram, trapes izplatības ierobežošana. Labāki rezultāti ir vidēja caurmēra grupā: to izstrādājot, nav nepieciešams liels laika patēriņš (Lindhe & Lindelöw, 2004).

Salīdzinot ražīguma rādītājus, raujot trupējušu un veselu egļu celmu raušanu, konstatēts, ka trupējušu celmu izraušanai nepieciešams par 11% mazāk laika, rēķinot uz vienu m<sup>3</sup> produktīvajā stundā. Līdzīgas atziņas ir arī A. Lazdiņa pētījumos (Lazdiņš, 2012; Zimelis et al., 2014), kur aprēķinātais ražīgums uzlabojas 9–30%.

### 3.2.3. Celmu pievešana

Darba laika uzskaitē, lai aprēķinātu ražīguma rādītājus, veikta 7 cismās (2.1. tabulā. un 2.2. tabulā), kopumā uz AGK pievedot 107 kravas. Izstrādātajā cismā (ID 360), kur pabeigta arī pievešana, dati par forvardera darba laika uzskaiti izslēgti no tālākas datu apstrādes. Tas saistīts ar meža mašīnu operatora apmācībām, kas notika šajā cismā. Pievešanas attālums ir no 140 m līdz 850 m.

Iekraušanas operācijai darba laika patēriņš vienai kravai ir no 15 līdz 42 minūtēm, bet izkraušanai – 9.4 - 33 minūtes (Tabula 3.6.). Laika patēriņš šīm operācijām skaidrojams ar operatoru pieredzi un izpratni par celmu krautnējumu veidošanu AGK. Proti, Ziemeļvalstīs līdzšinējā prakse, veidojot celmu krautnējumus, norāda uz tādu raksturīgu pazīmi, ka celmu koksnes krautnes ir šauru, bet stāvu kaudžu formā. Tas skaidrojams ar celmu materiāla specifiku uzglabāšanas laikā, kur ir svarīgi, lai pēc iespējas lielāka celmu kaudzes daļa tiktu skalota un žāvēta lietus, saules un vēja ietekmē. Ar to samazina minerālaugsnes īpatsvaru krautnē. Savukārt Latvijā izveidotās kaudzes (AGK un starpkrautuvēs) ir platas un ar lēzeniem sāniem, kā rezultātā minerālaugsne noskalojas uz krautnējuma apakšējo daļu, pasliktinot

biokurināmā kvalitāti (3.9. att.). Šī celmu koksnes kraušanas atšķirība ir par pamatu mazākiem ražīguma rādītājiem drupināšanas etapā. Problēmas krautņu kvalitātē lielā mērā saistītas ar celmu izstrādes un plēšanas darba metodē - lai palielinātu ražīgumu, ekskavatora operatori izvairījās no celmu pārplēšanas un šādus veselus celmus pēc tam ir grūti iekārtot kompaktā kaudzē. Strādājot ar MCR 500, šī problēma bija saistīta arī ar hidrosistēmas problēmām, kas neļāva pilnvērtīgi izmantot celmu plēšanas nazi.



Avots: autora foto

### 3.9. att. Starpkrautuve pēc celmu koksnes drupināšanas

Salīdzinot darba laika patēriņa sadalījumu dažādām tehnikas vienībām, konstatēts, ka pakalpojuma sniedzēji, kuri strādāja ar John Deere un Logset tehniku, celmu pievešanas darbu veica ātrāk. Savukārt ar Ponsse strādājošajam uzņēmumam darba izpilde prasīja vairāk laika. Uz forvarderu Ponsse strādājošajiem meža mašīnu operatoriem veiktas apmācības, kuras saistītas ar tehnikas regulēšanu un lietotajām darba metodēm un paņēmieniem, kā arī tehnikas stabilitāti meža darbos (3.10. att.). Pēc apmācību veikšanas ražīguma uzlabojums bija 50%, kas rezultējās ar produktīvā darba laika samazināšanos uz vienu kravu no 118 min uz 74 min.



Avots: autora foto

### 3.10. att. Nepareiza tehnikas ekspluatācijas un darba metožu neievērošanas rezultāts

Vidēji patērētais laiks uz vienu kravu iebraukšanai ir no 3 min līdz 20 min, bet izbraukšanai – no 5 min līdz 19 min. Nav ciešas sakarības starp vidējo patērēto laiku vienas kravas celmu pievešanā. Tas skaidrojams ar kravu fraktēšanas noteikumu neievērošanu, ka, sākot kravu veidot no tālākā cirsmas gala un tuvojoties cirsmas sākumam, ar katru nākamo reizi bija samazinās iebraukšanas un izbraukšanas attālumam. Lai papildus paaugstinātu sasniegtos ražīguma rādītājus, nepieciešams uzlabot meža mašīnu operatoru izpratni par kravu veidošanu. Uz ko norāda būtiski trūkumi pievešanā visās cirmās.

Pievešanas laikā iebraukšanas ātrums ir no 33 līdz 133 m min<sup>-1</sup>, bet izbraukšanas ātrums – no 18 līdz 100 m min<sup>-1</sup> (tabula 3.6.).

Pārvietošanās ātrumu pa cirsmu būtiski neietekmē celmu raušana uz tehnoloģiskās brauktuves. Lielākā priekšrocība, saglabājot celmus uz tehnoloģiskajām brauktuvēm, ir tehnikas nogrimšanas riska samazināšana, ja grunts nestspēja ir maza. Literatūrā pieejamā informācija par forvardera pārvietošanās ātrumu cirmā norāda uz vidēji 75 līdz 100 m min<sup>-1</sup> (Nordfjell et al., 2003; Kaleja et al., 2014; Rozītis et al., 2017). Jāņem vērā, ka tieša salīdzināšana nav iespējama, jo Latvijā un Ziemeļvalstīs ir atšķirīgas augsnes un operatoru pieredze. Jāņem vērā arī iepriekš minētās problēmas celmu izstrādes etapā. Plānojot pievešanu atcelmotās platībās, jāreķinās ar mazāku ražīguma kritumu, jo pārvietošanās ātrums iespējams lielāks. Jāņem vērā, ka Latvijas operatoriem pietrūkst pieredzes celmu raušanā un pievešanā, tāpēc, uzsākot ražošanu, sagaidāms pakāpenisks ražīguma un biokurināmo kvalitātes pieaugums.

Pētījumā konstatēts, ka forvardera produktīvais laiks celmu pievešanas operācijās ir no 88% līdz 100%, salīdzinot ar pievešanas darbiem Latvijā, kur šis rādītājs ir zemāks. Izmantojot ekvivalentas tehnikas vienības, produktīvās stundas darba laika īpatsvars ir no 77% līdz 94% (Rozītis et al., 2017). Pētījuma ietvaros neproduktīvo laiku veido tehnikas remonts, apkopes un meža mašīnu operatoru atpūta darba laikā. Teorētiski produktīvajam darba laikam nevajadzētu būt lielākam par 67%, ja maiņas ilgums ir 8 un vairāk stundas. Tas skaidrojams ar operatoru atpūtu darba laikā, pieņemot, ka operatori 45 min strādā un 15 min atpūšas. Šāda atpūta tiek pieņemta un iekļauta tālākos aprēķinos, reķinot ražīguma rādītājus. Publikācijās tas minēts kā rādītājs G15 (Talbot et al., 2003) vai E15 (Sirén and Aaltio, 2003), kas raksturo atpūtas ilgumu vienā stundā.

3.6. tabula. Produktīvā darba laika patēriņa sadalījums pa cirmām, min uz kravu

Tehnikas vienība	Cirsmas ID	Vidējais pievešanas attālums, m	Produktīvais laiks	Iebraukšana	Iekraušana	Pārvietošanās	Izbraukšana	Izkraušana	Pārvietošanās AGK	Pakošana	Citas	Stop
John Deere	58	140	42.5 ±1.9	3.3 ±1.0	18.1 ±1.1	2.9 ±0.4	5.4 ±0.6	9.4 ±0.5	0.6 ±0.2	-	3 ±0.4	3.4 ±1.1
	188	850	75.9 ±1.9	21 ±6.7	15.3 ±1.4	1.6 ±0.3	18.6 ±0.4	9.7 ±0.5	1.1 ±0.3	4.6 ±1.6	6.1 ±0.9	11.2 ±4.9
	326	760	101.3 ±16.8	19.8 ±8.1	28.2 ±4.7	3.7 ±1.1	27.6 ±4.9	15 ±2.8	-	6.4 ±3.1	9.8 ±3.0	1.7 ±0.4
Ponsse	98	157	118.5 ±15.4	15.2 ±5.1	39.5 ±3.9	8.2 ±1.5	16.6 ±3.3	28.5 ±5.0	-	-	10.5 ±3.9	-
	104	460	73.9 ±3.7	14.9 ±5.3	17.2 ±1.4	2.6 ±0.3	18.1 ±1.0	15 ±1.2	-	-	6.1 ±1.7	-
	176	262	114.9 ±17.1	11.4 ±3.4	41.8 ±6.5	6.8 ±1.5	15.7 ±2.3	33.3 ±5.0	-	-	6 ±1.4	-
Logset 4F	437	480	60.9 ±3.7	8.3 ±2.8	18.6 ±0.6	2.1 ±0.2	10.7 ±0.5	12.4 ±0.6	0.3 ±0.1	-	8.8 ±3.8	5.2 ±0.9

Avots: autora veidots

Sasniegtie ražīguma rādītāji izmēģinājumu cirmās celmu pievešanā ir no 3 līdz 12 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> produktīvajā darba laikā. Salīdzinoši nelieli ražīguma rādītāji saistīti ar forvardera kravas tilpnes neefektīvu izmantošanu, pieredzes trūkumu un izvairīšanos no celmu plēšanas izstrādes laikā. Veicot šādus nestandarta darbus, ražīguma samazinājums pret standarta cirsmu izstrādi, pievedot apaļos kokmateriālus, ir būtisks. Saskaņā ar LVM apkopoto informāciju galvenajā cirtē ražīgums ir no 9.4 līdz 16.9 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, vidēji 12.7 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, rēķinot pie 470 m vidējā pievešanas attāluma (AS "Latvijas valsts meži," 2018). Ārvalstu pētījumos sasniegtie ražīguma rādītāji produktīvajā stundā, izmantojot lielās klases tehniku, ir vēl lielāki (Tiernan et al., 2004; Jiroušek et al., 2007;).

### 3.2.4. Celmu transportēšana uz starpkrautuvi

Celmu transportēšana uz starpkrautuvi pilnā apjomā realizēta divām cirmām – ar ID 176 un 177. Savukārt, paraugkravu transportēšanai izmantoti 4 auto sastāvi no cirsmas ar ID 58. Tas skaidrojams ar drupināmā materiāla tālākās realizācijas varbūtējiem apgrūtinājumiem, jo pastāvēja risks pārsniegt pieļaujamos 5% pelnu saturu kurināmajā.

No cirmām ar ID 176 un 177 kopā izvestas 22 kravas un no cirsmas ar ID 58 – 4 kravas. Celmu iekraušana autovilciena konteinerā vidēji ilgst 28 ±5 min, bet piekabes konteinerā 19 ±2 min. Ņemot vērā, ka konteineru tilpums ir vienāds gan autovilcienam, gan piekabei (35 m<sup>3</sup>), diskusijās ar šoferi konstatēts, ka autovilcienā iekraušana jāveic uzmanīgāk, lai nebojātu bortus. Izkraušana no autotransporta ilgst 19 ±2 min, bet no piekabes – 2 ±1 min. Laika atšķirības skaidrojamas ar auto sastāva specifiku: no autovilciena materiāls ir jāizkrauj, bet no piekabes to iespējams izgāzt. Strādājot pēc šāda paņēmiena, kur uzsvars ir uz produktīvā darba laika palielināšanu, tiek zaudēts uz materiāla kvalitāti, jo izveidotās celmu kaudzes ir klājeniskas, tāpēc tās sliktāk žūst.

Celmu koksnes biomasas transportēšanas laikā uz starpkrautuvi ir jārēķinās ar daļēji piepildītām kravām, jo celmu koksni teju neiespējami sakraut konteineru tipa puspiekabē. Izmēģinājumu objektos tilpīguma koeficients celmu koksnes izvešanā ir 0.4, pētījumā sasniegtie ražīguma rādītāji - 3.5 t<sub>sausnas</sub> h<sup>-1</sup>. Celmu koksnes transportēšanas attālums līdz starpkrautuvei pētījumā ir 7 km. Līdz šim publicētajā informācijā par efektīvu transportēšanas attālumu minēts, ka līdz 10 km lielam attālumam ir vismazākās izmaksas uz vienu km (Eriksson et al., 2014), savukārt maksimāli pieļaujamais transportēšanas attālums, saskaņā ar dažādu pētījumu rezultātiem, ir 30 līdz 70 km (Lazdiņš et al., 2009; Asikainen, 2010; Eriksson et al., 2014; Nuutinen et al., 2016).

Pētījumā secināts, ka celmu pārvešana uz starpkrautuvi būtiski palielina biokurināmā ražošanas izmaksas, padarot šo biokurināmā veidu nekonkurētspējīgu, ja ir pieejamas mežizstrādes atliekas galvenajā cirtē vai sīkkosne no kopšanas cirtēm, tāpēc no šī ražošanas posma ir jāizvairās, veicot drupināšanu jau AGK.

Veicot celmu pārvešanu uz starpkrautuvi platībās, kur celmi rauti ar CBI kausu, konstatēta vēl viena problēma. Konteinervedējs bija aprīkots ar manipulatoru ar zaru satvērēju celmu iekraušanai un izkraušanai. Manipulatora izlice bija 7 m, kas ir pietiekoši, iekraujot apaļos kokmateriālus, bet izrādījās nepietiekoši, lai savāktu visus celmus. Lielā mērā šo problēmu radīja platā celmu kaudzes pamatne. Lai ielādētu visus celmus, nācās piesaistīt frontālo iekrāvēju, kas radīja papildus izmaksas un palielināja biokurināmā piesārņojumu ar augsni.

### 3.2.5. Celmu drupināšana

Celmu smalcināšana izmēģinājumos veikta ar vairākām iekārtām. Magnum Force 6800P drupinātāja ražīgums izmēģinājumos bija 110 tonnas h<sup>-1</sup>. Strādājot ar drupinātāju Doppstadt 441SM, ražīgums bija 26 t h<sup>-1</sup>. Pētījumā sasniegtie rādītāji ir mazāki, salīdzinājumā ar literatūrā

minētajiem (Irdla et al., 2017), un tas skaidrojams lielā mērā ar smalcināšanai nepiemērotu celmu izstrādes metodi – parasti celmi nebija pārplēsti un to ievadīšana drupinātājā prasīja papildus darba laika patēriņu. Lai sasniegtu labākus ražīgums rādītājus, vidēja izmēra un lielākos celmus nepieciešams sadalīt vismaz 4 daļās (Anerud, 2012). Celmu saplēšana palielinātu arī pievešana ražīgumu un uzlabotu celmu krāvuma kvalitāti AGK.

Drupinātāju darbības nodrošināšanai ar izejmateriālu piesaistīts autovilciens, kura efektīva darba laika izmantošana celmu iekraušanas procesā ir 78%. Laikietilpīgākā darbība ir gaidīšana uz Doppstadt drupinātāju (3.7. tabula.), kas skaidrojama gan ar lielo celmu izmēru, gan iekārtas nepietiekošo drupinātāja jaudu.

3.7. tabula. **Vidējais iekrāvēja darba laika patēriņš, nodrošinot drupinātāja Doppstadt darbību**

Darba operāciju komplekss	Operācija	Laika patēriņš, s
Tiešais darbs	Sniedzas pēc materiāla	13.2 ± 0.7
	Materiāla satveršana	3.4 ± 0.2
	Iekraušana	13.4 ± 0.8
	Kārtošana	-
Citas ar darbu saistītas darbības	Citas ar darbu saistītas darbības	-
	Gaidīšana uz drupinātāju	51.9 ± 10.2
Pārtraukumi	Pārtraukumi	338.5 ± 230.0

Avots: autora veidots

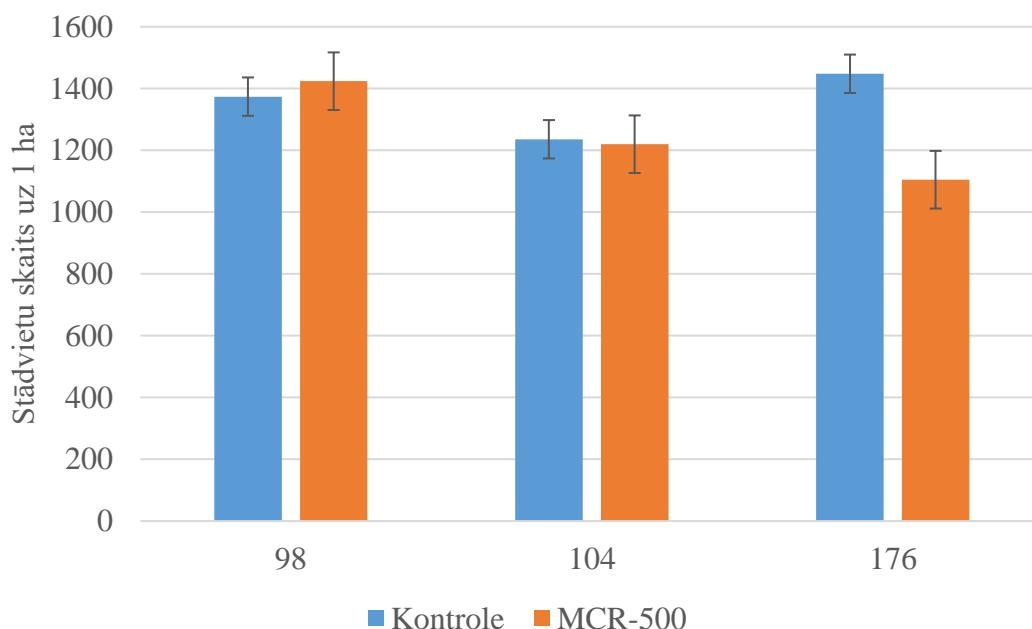
Pēc celmu koksnes drupināšanas ievākti sasmalcinātās koksnes paraugi analizēšanai sadalījumā pa frakcijām atbilstoši standartam LVS CEN/TS 15149-1. Procentuālais sadalījums koksnes gabaliņu garuma grupā 63-100 mm nav konstatēts, 45–63 mm grupā – 2%, 13–45 mm grupā – 29%, 7–13 mm grupā – 25%, 3–7 mm grupā – 28% un koksnes smalkumi < 3 mm – 15%. Ar šādiem frakciju izmēriem celmu koksne ir piemērota vidēja un liela izmēra katlumājām (Alakangas, 2005; Kofman, 2010). Pētījumā konstatēts, ka pēdējo kravu kvalitāte būtiski pasliktinās (pelnu saturs pārsniedza 10%, lai arī lielākajā daļā kravu tas nepārsniedz 3%), jo pēdējās šķeldu kravās nonāk augsnes daļiņas, kas ieskalojušās celmu kaudžu lejasdaļā. Šī atziņa vēlreiz norāda uz nepieciešamību pievērst pastiprinātu uzmanību celmu pievešanai un krautnēšanai, kā arī celmu plēšanai izstrādes laikā.

### 3.2.6. Drupinātās koksnes transports

Drupinātās koksnes uzkrāšanai patērētais laiks, atkarībā no piekabes veida, būtiski nemainās, tas ir starp 30 un 32 min. Tas skaidrojams ar papildus tehnikas izmantošanu – frontālo iekrāvēju, kurš strādā ar konstantu ražīgumu. Nepieciešamība izmantot frontālo iekrāvēju starpkrautuvē pasliktina biokurināmā kvalitāti, jo reizē ar šķeldām kravā nonāk arī augsne. Salīdzinot izkraušanai patērēto laiku, puspiekabei un konteineru piekabei patērētais laiks atšķiras. Konteineru izkraušanai nepieciešamas vidēji 11 min., bet puspiekabei 18 min. Konstatētas atšķirības skaidrojamas ar puspiekabes izkraušanas tehnoloģiju – materiāla izkraušanai izmantojot kustīgo grīdu, nepieciešams ilgāks laiks. Savukārt konteineru izkraušana ne visur ir iespējama, jo vairums lielo katlumāju pielāgotas puspiekabēm un kurināmā pieņemšanas vietā jumts ir pārāk zems, lai paceltu konteineru, attiecīgi, ir nepieciešams frontālais iekrāvējs, kas pārved kurināmo uz kurināmā krātuvi. Darba ražīguma pieaugums iespējams, veicot drupināšanu AGK un ielādējot šķeldas tieši šķeldu vedēja puspiekabē.

### 3.3. Augsnes sagatavošanas izvērtējums, izmantojot MCR-500 II

Pētījumā izmantotais augsnes sagatavošanas kvalitātes kritērijs, izmantojot pacilu metodi, ir sagatavoto stādvieta skaits (Zimelis et al., 2012). Izmēģinājumu platībās, kurās augsni sagatavoja disku frēze (kontrolē), izveidotas  $1352 \pm 50$  pietikoši lielas stādvietas uz vienu hektāru, bet, izmantojot celmu raušanas iekārtu -  $1250 \pm 72$  stādvietas uz vienu hektāru (3.11. att.). Statistiski būtiskas atšķirības ( $p = 0.03$ ) konstatētas augsnes sagatavošanā cirmā ar ID 176.



Avots: autora veidots

#### 3.11. att. Sagatavoto stādvieta skaits

Laiks pacilu sagatavošanai ar celmu raušanas iekārtu MCR 500 platībā ar ID 98 bija 20% no kopējā laika, savukārt platībā ar ID 104 – 28% un platībā ar ID 176 – 8% no kopējā darba laika. Augsnes gatavošana ar disku frēzi patērētas  $89 \pm 18$  min. ha<sup>-1</sup>, bet, izmantojot celmu raušanas-plēšanas iekārtu,  $229 \pm 21$  min. ha<sup>-1</sup>. Salīdzinot ražīguma izmaiņas, raujot celmus ar MCR 500 II un papildus gatavojot augsni, konstatēts ražīguma samazināšanās par 15%, sasniedzot  $11.1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . Degvielas patēriņš, strādājot ar disku frēzi, ir  $18 \text{ L ha}^{-1}$  (neskaitot tehnikas pārvadāšanas transportu,  $38 \text{ L } 100 \text{ km}^{-1}$ ), bet izmantojot ekskavatoru, degvielas patēriņš augsnes sagatavošanai ir  $49 \text{ L ha}^{-1}$ . Vērtējot līdzīgus pētījumus, kuros augsne gatavota, veidojot pacilas, konstatēts, ka laiks, kas nepieciešamais, lai sagatavotu atbilstošo stādvieta skaitu, izmantojot, piemēram, Karl-Oskar iekārtu, ir 8 h, bet MPV 600 kausu – 6.4 h, sagatavojot no 1098 līdz 1619 stādvieta uz viena hektāra (Lazdiņa, 2012; Lazdiņa et al., 2012; Lazdiņš et al., 2014). Jāpiebilst, ka MPV 600 pacilotājs veidots uz celmu rāvēja - plēsēja MCR 500 bāzes šī pētījuma ietvaros, atdalot augsnes gatavošanas moduli no celmu rāvēja un palielinot augsnes gatavotāja virsmas laukumu. MPV 600 ir patentēts šī pētījuma ietvaros.

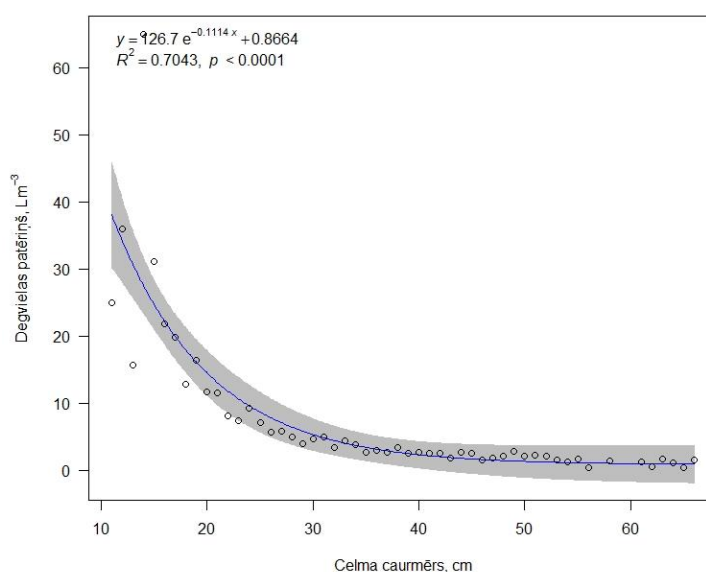
### 3.4. Celmu izstrādes energoresursu patēriņa bilance

Energoresursu patēriņa aprēķināšanai dažādiem meža darbiem noteikts kopējais energopatēriņš un identificēts efektīvākais celmu raušanas un pievešanas variants. Līdzīgi aprēķini veikti celmu drupināšanai un koksnes tālākam transportam. Zemākā siltumspēja, atbilstoši laboratorijā iegūtiem mērījumiem, celmu koksnei kopumā aprēķināta 3 paraugu sērijām, kur 1. sērijai tā ir vidēji  $189 \text{ MWh ha}^{-1}$ , 2. sērijai –  $210 \text{ MWh ha}^{-1}$  un trešajai sērijai –



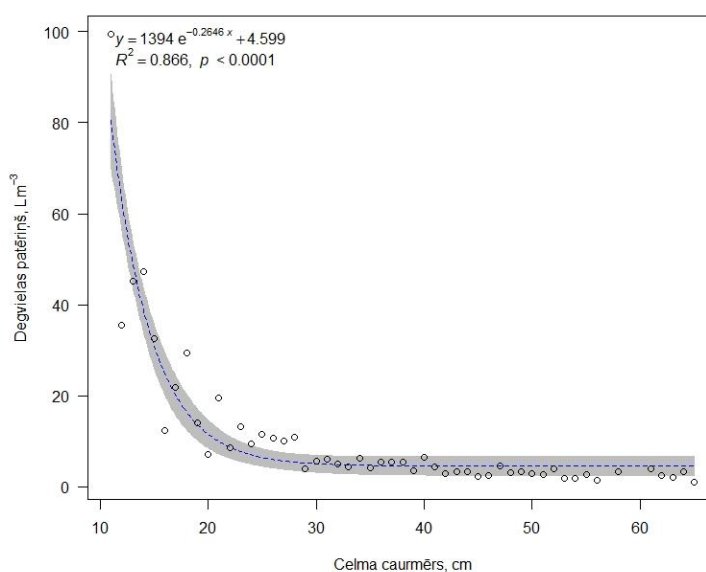
397 MWh ha<sup>-1</sup>. Lai aprēķinātu energoefektivitāti, celmu koksnes zemākā siltumspēja pieņemta atbilstoši vidējiem rādītājiem, kas iegūti izmēģinājumos – 265 MWh ha<sup>-1</sup>. Pētījumos, kuros analizēta celmu koksnes siltumspēja, iegūtie rādītāji ir no 170 līdz 250 MWh ha<sup>-1</sup> (Rolfsson, 2006; Eriksson & Gustavsson; 2008; Anerud, 2012). Latvijā iegūtie lielākie rādītāji saistīti ar lielāku celmu krāju uz platības vienību, kas, savukārt, saistīts ar lielākām celmu dimensijām.

Strādājot ar Komatsu PC210LC (3.12. att.), kurš aprīkots ar CBI raušanas iekārtu, atbilstoši koksnes drupināšanas tehnoloģijai un resursu ieguvei no meža, pievadāmais energoresursu apjoms strauji sāk samazināties, ja izraujamo celma caurmēru 20 cm. Salīdzinot ar MCR 500 II (3.13. att.), energoresursu patēriņa straujš samazinājums novērojams tajās pašās celmu caurmēra grupās. Atšķirības starp celmu raušanas galvām nav statistiski būtiskas ( $p = 0.24$ ), bet jāņem vērā, ka, strādājot ar MCR 500 II un veicot atcelmošanu platībās, kur celmu caurmērs ir līdz 20 cm, ieguldāmais energoresursu patēriņš būs būtiski lielāks.



Avots: autora veidots

3.12. att. Degvielas patēriņš, strādājot ar Komatsu PC210LC ekskavatoru, L m<sup>-3</sup>



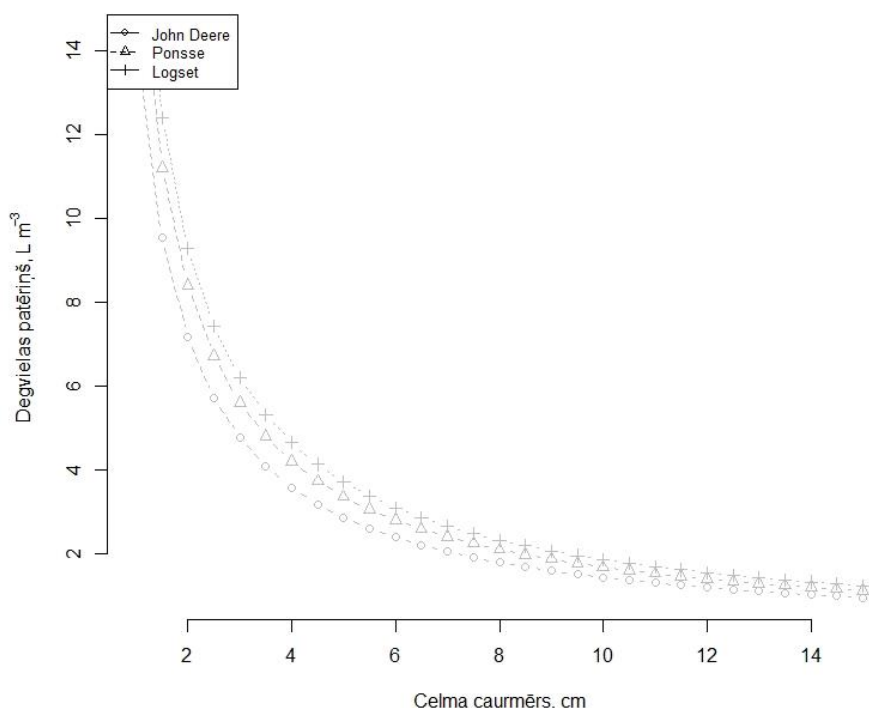
Avots: autora veidots

3.13. att. Degvielas patēriņš, strādājot ar New Holland E215B ekskavatoru, L m<sup>-3</sup>



Salīdzinot degvielas patēriņu pie vienāda vidējā izstrādājamā celma caurmēra (42 cm), strādājot ar CBI celmu raušanas iekārtu, tas ir  $0.91 \text{ L m}^{-3}$ , savukārt, strādājot ar MCR 500 II, degvielas patēriņš ir  $1.05 \text{ L m}^{-3}$ . Jāatzīmē, ka tehniskā mašīnu gatavība nav vienāda abām salīdzinātajām iekārtām, tāpēc MCR 500 prototipam degvielas patēriņš var samazināties, pilnveidojot darba metodi.

Forvardera ražīguma ietekme uz kopējo energoefektivitāti celmu biokurināmā ražošanā pētījumā nebija būtiska, ja ražīgumu pārsniedza  $5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  (3.14. att.). Pētījumā konstatētais degvielas patēriņš, strādājot ar John Deere 810D, ir  $14.3 \text{ L h}^{-1}$ . Logset forvardera degvielas patēriņš aprēķināts pēc Lofflera formulas, un, ņemot vērā tā dzinēja jaudu (170 hp), aprēķinātais patēriņš ir  $18.5 \text{ L h}^{-1}$ . Veicot celmu pievešanu ar Ponsse Bufallo, uzskaitītais degvielas patēriņš ir  $16.8 \text{ L h}^{-1}$ ; līdzīgos pētījumos Latvijā, testējot dažādas atbalstšķēdes, konstatētais degvielas patēriņš kokmateriālu pievešanā var sasniegt  $17.7 \text{ L h}^{-1}$  (Lazdiņš, 2017).



Avots: autora veidots

### 3.14. att. Degvielas patēriņš, strādājot ar forvarderu, $\text{L m}^{-3}$

Salīdzinot degvielas patēriņu pie vienāda ražīguma ( $7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ), un, piedot ar John Deere 810D, aprēķinātais patēriņa rādītājs ir  $2.05 \text{ L m}^{-3}$ ; strādājot ar Ponsse Gazelle -  $2.40 \text{ L m}^{-3}$  un ar Logset 4F -  $2.65 \text{ L m}^{-3}$ . Degvielas patēriņš samazinās zem  $1 \text{ L m}^{-3}$ , sasniedzot ražīgumu  $15 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

Pēc izraušanas un pievešanas tālākie tehnoloģiski nepieciešamie darbi ir saistīti ar celmu koksnes pārstrādi. Degvielas patēriņš sadalījumā pa darba operācijām aprēķināts atbilstoši Lofflera izstrādātajam vienādojumam, kura pamatā ir dzinēja jauda (3.8. tabula).

3.8. tabula. **Degvielas patēriņš autotransportam, celmu drupināšanas un sijāšanas iekārtām**

Darba operācijas nosaukums	Tehnikas nosaukums	Degvielas patēriņš, L h <sup>-1</sup>
Transports uz starpkrautuvi	Scania R480	27.0
	Scania R 500	32.0
Drupināšana	CBI Magnum Force 6800P	80.0
	Shredder DW 2060	22.3
	Doppstadt 441SM	8.1
Transports gala patērētājam	Volvo L90C	16.8
	Scania 380	39.3
	Scania 420	39.3
	Scania R 500	32.0
	Volvo FM	31.0

Avots: autora veidots

Celmu koksnes pārvedot no AGK uz starpkrautuvi, kas atrodas 7 km attālumā, Scania R480 patērēja 1.29 L m<sup>-3</sup>, bet Scania R500 - 1.52 L m<sup>-3</sup>. Aprēķinātās atšķirības saistītas ar to, ka Scania R500 degvielas patēriņš ir vidēji par 19% lielāks nekā otrai mašīnai.

Celmu drupināšanai, izmantojot CBI Magnum Force 6800P un atbilstoši vidējiem ražīguma rādītājiem, pētījumā bija 0.69 L m<sup>-3</sup>, bet, izmantojot drupinātāju Shredder DW2060, degvielas patēriņš bija mazāks - 0.56 L m<sup>-3</sup>. Jāņem vērā, ka 2. gadījumā izmantots arī sijātājs Doppstadt 441SM, kura degvielas patēriņš ir 1.31 L m<sup>-3</sup>. Līdz ar to kopējais degvielas patēriņš šim mašīnu komplektam ir 1.87 L m<sup>-3</sup>. Praksē, piemēram, Somijā, gatavojot biokurināmo verdošā slāņa katliem, sijātājus neizmanto, jo atbilstošu kurināmā kvalitāti nodrošina labās prakses noteikumu ievērošana visos ražošanas etapos. Attiecīgi, sijātāja radīto degvielas patēriņu energobilances aprēķinos ražošanas apstākļiem var neņemt vērā. Pēc celmu drupināšanas sagatavotais koksnes energoresursa gala produkts pētījumā tika nobērts uz zemes, līdz ar to vajadzēja izmantot frontālo iekrāvēju šķeldu iekraušanai autovilciena sastāvā. Pētījumā izmantots iekrāvējs Volvo L90C, kura degvielas patēriņš izmēģinājumos bija 0.48 L m<sup>-3</sup>.

Salīdzinot enerģijas patēriņu autovilcieniem Scania 380 un Scania 420, konstatēts, ka abām mašīnām ir līdzīgs degvielas patēriņš – vidēji 1.87 L m<sup>-3</sup>; savukārt Scania R500 un Volvo FM tas ir nedaudz mazāks, attiecīgi, 1.52 L m<sup>-3</sup>, bet – 1.40 L m<sup>-3</sup>, aprēķinātā patēriņa atšķirības saistītas ar dzinēja jaudu.

Saskaņā ar pētījuma rezultātiem efektīvākais celmu koksnes izstrādes tehnoloģiskais risinājums ir plānot izstrādi ar MCR 500 II un pievešanu veikt ar John Deere 810D vai ekvivalentu vidējās klases forvarderu. Ja nepieciešama celmu pārvešana uz starpkrautuvi, jāizvēlas transports ar mazāko degvielas patēriņu. Neatkarīgi no tā, vai celmus plānots drupināt AGK vai starpkrautuvē, būtiski veidot šauras un augstas celmu krautnes, lai visus celmus varētu aizsniegt ar drupinātāja vai autovilciena manipulatoru. Būtiskākie celmu transportēšanas mašīnu atlases kritēriji ir no metāla izgatavota kravas tilpne (tas saistīts ar ilgmūžību, jo, metot kravas tilpnē līdz 2 tonnās smagus celmus, var tikt bojāts kontainers). Transportam jābūt aprīkotam ar manipulatoru celmu iekraušanai vai arī iekraušanu jāveic ar forvarderu. Manipulators būtiski samazina mašīnas kravnesību, kā arī palielina celmu izkraušanai patērējamo laiku, tāpēc forvardera izmantošana, efektīvi plānojot darbus, ir labāks risinājums celmu iekraušanai kravas mašīnā, transportējot materiālu uz starpkrautuvi. Somijā izmanto arī puspiekabes ar hidraulisku presi, kas kompaktizē celmus, taču šāds papildaprīkojums

vienlaicīgi samazina autovilciena kravnesību un palielina cenu, tāpēc vispirms ir jānodrošina optimāls celmu rāvēja darbs, lai celmus varētu sakraut kompakti gan krautuvē, gan mašīnā. Divu konteineru sistēmai ar manipulatoru, kas uzstādīts starp kokvedējiem, ir vēl viens trūkums. Kabīnei tuvāko konteineru nevar izgāzt, tāpēc tajā uzkrājas augsne, kas periodiski jātīra ar lāpstu vai greiferi.

Celmu drupināšanai piemērotākā iekārta saskaņā ar pētījuma rezultātiem ir drupinātājs, kurš nodrošina ražīgumu virs  $100 \text{ t h}^{-1}$ . Tomēr arī šim drupinātājam ir savi trūkumi - šķeldu transportierim ir plašs materiāla izkliedes rādiuss, kā rezultātā drupinātājs nevar pildīt materiālu tieši autovilcienā, tāpēc šķeldu transportēšanā jāiesaista vēl 1 iekārta - frontālais iekrāvējs, kas uzpilda autovilcieni. Šāda pieeja pasliktina šķeldu kvalitāti, tāpēc praksē ir jāmeklē risinājums, kas ļauj sasmalcināto materiālu iepildīt tieši autovilcienā.

Drupinātās koksnes tālākam transportam ieteicams izvēlēties autovilcieni ar puspiekabi, – pētījumā šo risinājumu pārstāvēja Volvo FM autovilciens, kas uzrādīja vismazāko degvielas patēriņu pie vienāda transportēšanas attāluma.

Kopējais degvielas patēriņš drupinātās koksnes izstrādes tehnoloģijā (neierēķinot augsnes sagatavošanu) ir  $6.82 \text{ L m}^{-3}$ . Aprēķinātais kopējās lietderības koeficients ir 3.9. Tas nozīmē, ka, sadedzinot celmu šķeldas, iegūstamais enerģijas daudzums, ir 3.9 reizes lielāks, nekā energoresursu patēriņš ražošanas un piegādes procesā. Pētījumā identificēti arī vairāki risinājumi energoresursu patēriņa samazināšanai ražošanas procesā, piemēram, veicot drupināšanu AGK un iepildot šķeldas tieši autovilcienā, kā arī celmu raušanas - plēšanas kvalitātes uzlabošana, lai palielinātu pievešanas un pārējo tehnoloģisko procesu efektivitāti.

## SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS

1. Potenciāli pieejamo celmu koksnes resursu novērtēšanai precīzākā aprēķinu metode ir balstīta uz meža ekosistēmu iedalījumu, atkarībā no šī resursa ieguves iespējamības. Saskaņā ar MSI datiem potenciāli pieejamais celmu koksnes apjoms, kas Latvijas teritorijā atbilst 103 TWh primārās enerģijas. Balstoties uz aprēķiniem un ievērojot pētījumā izvirzītos pieņēmumus, ik gadu pieejamas 349 GWh primārās enerģijas, kas var aizstāt 16% no kopējās valstī patērētās kurināmās koksnes. Precīzākiem aprēķiniem nepieciešams noskaidrot celmu koksnes vidējo reducēto blīvumu sadalījumā pa koku sugām.
2. Izmantojot multifunkcionālas iekārtas prototipu MCR 500, darba procesā konstatētas nepilnības, kas ietekmē kopējo tehnikas noslodzi. Atsevišķas tehnoloģiskas darbības tiešā veidā negatīvi ietekmē celmu izcelšanas, saplēšanas un purināšanas ražīgumu. Pēc izmēģinājumiem ar MCR 500 pirmo prototipu veikta virkne uzlabojumu – cilindra stiprinājuma pazemināšana, konstrukcijas izturības palielināšana, hidropievadu šķērsgriezuma palielināšana un augsnes gatavošanas agregāta virsmas palielināšana. Pēc uzlabojumiem MCR 500 otra prototipa ražīguma pieauguma par 59%, sasniedzot CBI ražīgumu, papildus nodrošinot iespēju kvalitatīvi veikt augsnes sagatavošanu.
3. Celmu raušanas-plēšanas procesā negatavojošā augsni, konstatēts: strādājot ar prototipu MCR 500 II, lietderības koeficients ir 19.9 (pie ražīguma  $13.1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ); savukārt, strādājot ar CBI iekārtu, lietderības koeficients ir 22.2 (pie ražīguma  $13.6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ). Ar izstrādāto prototipu var veikt celmu raušanu un augsnes sagatavošanu, jo pacilu gatavošanas procesā ir svarīgi apgriezto velēnu piespiest, nodrošinot  $0.4 \text{ m}^2$  liela mineralizēta lakuma izveidošanu. Raujot celmus ar MCR 500 II un papildus gatavojot augsni, ražīgums samazinās par 15%, sasniedzot tikai  $11.1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  (lietderības koeficients celmu raušanai un augsnes gatavošanai ir 16.9).
4. Saskaņā ar pētījuma rezultātiem, efektīvākais risinājums celmu koksnes izstrādei ir celmu raušana - plēšana ar MCR 500 II iekārtu, celmu pievešana ar vidējas klases forvarderu, piemēram, John Deere 810D, drupināšana starpkrautuvē, izmantojot lieljaudas drupinātāju CBI Magnum Force 6800P vai ekvivalentu, un drupinātās koksnes nogādāšana patērētājam ar autovilcienu, kas aprīkots ar puspiekabi, piemēram, Volvo FM. Pētījumā kopējais degvielas patēriņš celmu ražošanā bija  $6.82 \text{ L m}^{-3}$ , kas veido pozitīvu lietderības koeficientu ir 3.9, t.i., enerģijas patēriņš kurināmā ražošanai ir 3.9 reizes mazāks nekā patērētājiem piegādātās enerģijas daudzums.
5. Būtisku degvielas patēriņa samazinājumu kurināmā ražošanā var panākt, uzlabojot celmu raušanas - plēšanas darba metodi (saplēšot vidēja un liela izmēra celmus vismaz 2 daļās, ko var ērtāk novietot gan forvardera kravas telpā, gan celmu krautnē). Celmu plēšana uzlabo arī celmu krautņu kvalitāti (pamatnes platums ne lielāks par 3 m). Izmantojot drupinātāju AGK, var nodrošināt šķeldu iekraušanu tieši autovilcienā. Šie risinājumi teorētiski ļauj samazināt degvielas patēriņu vismaz par 35%, kā arī ļauj būtiski samazināt celmu kurināmā ražošanas izmaksas.
6. Celmu raušanas-plēšanas procesa nodrošināšanai ieteicama darba metode, kura paredz tehnikas pārvietošanos starp tehnoloģiskajām brauktuvēm, celmu raušanu veikt no labās uz kreiso pusi attiecībā pret pārvietošanās virzienu, tādējādi optimizējot laika patēriņu un paaugstinot ražīgumu. Izrautos celmus vajag nokraut nelielās kaudzēs 4-8 m attālumā no tehnoloģiskās brauktuves ass, tādējādi nodrošinot optimālus darba apstākļus arī forvarderam. Celmu rāvēja darba pozīcijas maiņa jāorganizē, pārvietojoties celmu raušanas virzienā par 1 – 5 m, un tādējādi maksimāli izmantojot tehnikas priekšrocības, jo ar izlīci 4 m var izraut celmus ar diametru līdz 43 cm, un reizē nepasliktināt tehnikas šķērsstabilitāti. Minerālaugsnes piejaukumu nopurināšanai rekomendējama celma sadalīšana vairākās daļās augstu virs zemes tā lai pāršķeltie celma fragmenti atsistos pret zemi.

7. Pētījumā izstrādāta tehnoloģiskā iekārta un darba metodes celmu raušanai un augsnes sagatavošanai, kā arī aprēķināta kopējā energobilance, kas norāda uz šī resursa ieguves potenciālu, bet papildus nepieciešams izvērtēt ekonomisko ieguvumu, iekļaujot aprēķinā mežsaimnieciskos ieguvumus – egļu audzēs samazināt sakņu trapes (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.) izplatības risku, atteikties no 1. agrotehniskā kopšanas, jo platībā, kur gatavotas pacilas, tā nav nepieciešama, kā arī samazināt priežu lielā smecernieka (*Hylobius labietis* L.), meža maijvaboles (*Melolontha hippocastani* Fabr.) un egļu lielā sakņgrauža (*Hylastes cunicularius* Er.) bojājumus.

## IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. Alakangas, E. (2005). Properties of wood fuels used in Finland. Jyvaskyla. Pieejams: [https://www.researchgate.net/profile/Vera\\_Moitinho/post/I\\_am\\_looking\\_for\\_the\\_calorific\\_value\\_of\\_Pinus\\_nigra\\_or\\_and\\_sylvestris/attachment/59d64d2379197b80779a6c28/AS:487050634895362@1493133328878/download/%5BAkangas\\_2005%5D.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Vera_Moitinho/post/I_am_looking_for_the_calorific_value_of_Pinus_nigra_or_and_sylvestris/attachment/59d64d2379197b80779a6c28/AS:487050634895362@1493133328878/download/%5BAkangas_2005%5D.pdf)
2. Anerud, E. (2012). Stumps as fuel. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences. Pieejams: [https://pub.epsilon.slu.se/9153/1/anerud\\_e\\_121024.pdf](https://pub.epsilon.slu.se/9153/1/anerud_e_121024.pdf)
3. AS "Latvijas valsts meži". (2008). Kopšanas ciršu rokasgrāmata. Rīga. Pieejams: [https://www.lvm.lv/images/lvm/Petijumi\\_un\\_publicijas/KC-rokasgramata.pdf](https://www.lvm.lv/images/lvm/Petijumi_un_publicijas/KC-rokasgramata.pdf)
4. AS "Latvijas valsts meži". (2015). Vadlīnijas pievešanas apstākļu noteikšanai. Rīga. Pieejams: [https://www.lvm.lv/images/lvm/Profesionali/Mežizstrāde/Pielikumi/Pievesanas\\_apstaklu\\_noteikšanas\\_vadlinijas\\_v.03.pdf](https://www.lvm.lv/images/lvm/Profesionali/Mežizstrāde/Pielikumi/Pievesanas_apstaklu_noteikšanas_vadlinijas_v.03.pdf)
5. AS "Latvijas valsts meži". (2017). Apaļo kokmateriālu kvalitātes prasības. Rīga: AS "Latvijas valsts meži." Pieejams: [http://www.lvm.lv/images/lvm/koksnes\\_produkta/ligumu\\_pielikumi/2017.gad\\_a\\_I\\_pusg/AKKP\\_2017.01\\_uz\\_2017\\_I.pdf](http://www.lvm.lv/images/lvm/koksnes_produkta/ligumu_pielikumi/2017.gad_a_I_pusg/AKKP_2017.01_uz_2017_I.pdf)
6. AS "Latvijas valsts meži". (2018). Forvarderu ražīgums. Pieejams: [https://www.lvm.lv/images/lvm/Profesionali/Mežizstrāde/Forvarderu\\_darb\\_a\\_razigums/2018/GC-F-DR\\_01.2018.pdf](https://www.lvm.lv/images/lvm/Profesionali/Mežizstrāde/Forvarderu_darb_a_razigums/2018/GC-F-DR_01.2018.pdf)
7. Asikainen, A. (2010). Simulation of stump crushing and truck transport of chips. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 25(3), 245–250. <https://doi.org/10.1080/02827581.2010.488656>
8. Athanassiadis, D., Lindroos, O., & Nordfjell, T. (2011). Pine and spruce stump harvesting productivity and costs using a Pallari KH 160 stump-lifting tool. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 26(5), 437–445. <https://doi.org/10.1080/02827581.2011.573502>
9. Bārdulis, A., Jansons, A., & Liepa, I. (2012). Below-ground biomass production in young stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on abandoned agricultural land. In: Annual 18<sup>th</sup> International Scientific Conference Proceedings 'Research for Rural Development 2012', Jelgava, Latvia, 16–18 May 2012, pp. 49–54.
10. Berg, S., Bergström, D., Athanassiadis, D., & Nordfjell, T. (2012). Torque required to twist and cut loose Scots pine stumps. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 27(8), 724–733. <https://doi.org/10.1080/02827581.2012.721002>
11. Berg, S., Bergström, D., & Nordfjell, T. (2015). Effect of stump size and timing of stump harvesting on ground disturbance and root breakage diameter. *Silva Fennica*, 49, 17. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14214/sf.1312>
12. Björheden, R. (2010). Efficient forest fuel supply systems. R&D programme 2007–2010. Uppsala. Pieejams: <https://www.skogforsk.se/contentassets/13f65170eaa5477b842f4d2f3de7b282/ess-2007-2010-eng-low.pdf>
13. Broks, J. (2003). Meža enciklopēdija. Rīga, Zelta grauds, 367 lpp.
14. Būmanis, K. (2013). Koksnes biomasas izmantošana enerģijas ieguvē monitorings. Jelgava. Pieejams: [https://www.llu.lv/sites/default/files/zps\\_projekti/69296\\_Koksnes\\_biomasas\\_izmantos%CC%8Canas\\_energ%CC%A7ijas\\_ieguve%CC%84\\_monitorings\\_\(2013\).pdf](https://www.llu.lv/sites/default/files/zps_projekti/69296_Koksnes_biomasas_izmantos%CC%8Canas_energ%CC%A7ijas_ieguve%CC%84_monitorings_(2013).pdf)
15. Czupy, I., & Horváth-Szováti E. (2005). Experimental definition of the primary force of stump. *Hungarian Agricultural Engineering*, 18, 64–66.

16. Czupy, I., & Horváth-Szováti, E. (2013): Vertical force requirement for stump lifting. *Journal of Forest Science*, 59, 267271.
17. Ericsson, K., & Werner, S. (2016). The introduction and expansion of biomass use in Swedish district heating systems. *Biomass and Bioenergy*, 94, 57–65.  
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.08.011>
18. Eriksson, A., Eliasson, L., Hansson, P., & Jirjis, R. (2014). Effects of Supply Chain Strategy on Stump Fuel Cost: A Simulation Approach. *International Journal of Forestry Research*, 2014, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2014/984395>
19. Eriksson, A., Eliasson, L., & Jirjis, R. (2014). Simulation-based evaluation of supply chains for stump fuel. *International Journal of Forest Engineering*, 25(1), 23–36. <https://doi.org/10.1080/14942119.2014.892293>
20. Eriksson, L.N., & Gustavsson, L. (2008). Biofuels from stumps and small roundwood – Costs and CO<sub>2</sub> benefits. *Biomass and Bioenergy*, 32(10), 897–902.  
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.01.017>
21. Eriksson, M., & Lindroos, O. (2014). Productivity of harvesters and forwarders in CTL operations in northern Sweden based on large follow-up datasets. *International Journal of Forest Engineering*, 25(3), 179–200. <https://doi.org/10.1080/14942119.2014.974309>
22. Grīnfelds, A. (1971). Pētījumi par priedes gāšanu ar saknēm Latvijas PSR apstākļos. Jelgava.
23. Hakkila, P. (1975). Bark percentage, basic density and amount of acetone extractives in stump and root wood. *Folia Forestalia*, 14.
24. Heinonen, T., Pukkala, T., Mehtätalo, L., Asikainen, A., Kangas, J., & Peltola, H. (2017). Scenario analyses for the effects of harvesting intensity on development of forest resources, timber supply, carbon balance and biodiversity of Finnish forestry. *Forest Policy and Economics*, 80, 80–98. <https://doi.org/10.1016/J.FORPOL.2017.03.011>
25. Henning, F., (2001). Commercial timber harvesting in the natural forests of Mozambique. Rome. Pieejams: <http://www.fao.org/3/a-y3061e.pdf>
26. Hofsten, von H. (2008). From Skogforsk News. Uppsala Science Park, p. 8. Pieejams: <https://www.yumpu.com/en/document/read/33769928/skogforsk-news-no1-2008>
27. International, B. (2019). Swedish forest harvests approaching maximum sustainable levels. Pieejams: <https://bioenergyinternational.com/feedstock/swedish-forest-harvests-approach-maximum-sustainable-levels-as-roundwood-prices-surge>
28. Irdla, M., Padari, A., Kurvits, V., & Muiste, P. (2017). The chipping cost of wood raw material for fuel in Estonian conditions. *Forestry Studies*, 66, 65–74. Pieejams: <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/fsmu.2017.66.issue-1/fsmu-2017-0007/fsmu-2017-0007.pdf>
29. Jalkanen, A., Mäkipää, R., Ståhl, G., Lehtonen, A., & Petersson, H. (2005). Estimation of the biomass stock of trees in Sweden: comparison of biomass equations and age-dependent biomass expansion factors. *Annals of Forest Science*, 62(8), 845–851. <https://doi.org/10.1051/forest:2005075>
30. Jiroušek, R., Klvač, R., & Skoupý, A. (2007). Productivity and costs of the mechanised cut-to-length wood harvesting system in clear-felling operations. *Journal of Forest Science*, 53(5310), 476–482.  
Pieejams: <http://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/00421.pdf>
31. Kaleja, S., Lazdiņš, A., & Zimelis, A. (2014). Impact of assortments' structure on harvesting productivity and costs of pre-commercial thinning. *Research for Rural Development* 2014, 2.
32. Kalniņš, A. (1944). Ķīmiskā meža tehnoloģija. Rīga: Saimniecības literatūras apgāds.
33. Kärhä, K. (2012). Comparison of Two Stump-Lifting Heads in Final Felling Norway Spruce Stand. *Silva Fennica*, 46(4).  
Pieejams: <http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf46/sf464625.pdf>

34. Kärhä, K., & Mutikainen, A. (n.d.). Testing two novel stump-lifting heads in a final felling norway spruce stand. Pieejams: [http://metsate1.asiakkaat.sigmatic.fi/wp-content/uploads/2009/09/Tiedote\\_19\\_2009\\_6\\_1\\_Proceedings\\_Testing\\_two\\_novel\\_stump.pdf](http://metsate1.asiakkaat.sigmatic.fi/wp-content/uploads/2009/09/Tiedote_19_2009_6_1_Proceedings_Testing_two_novel_stump.pdf)
35. Kofman, D. (2010). Quality wood chip fuel. Dublin. Pieejams: <http://www.woodenergy.ie/media/coford/content/publications/projectreports/cofordconnects/finalfuelquality.pdf>
36. Laitila, J., Ranta, T., & Asikainen, A. (2008). Productivity of Stump Harvesting for Fuel. *International Journal of Forest Engineering*, 19(2), 37–47. <https://doi.org/10.1080/14942119.2008.10702566>
37. Lazdāns, V., Lazdiņš, A., Zimelis, A., Norden, B., Iwarsson-Wide, M., Von Hofsten, H., & Thor, M. (2008). Forest energy from small dimension stands, “infrastructure objects” and stumps: projekta pārskats. Uppsala.
38. Lazdiņa, D. (2008). Celmu izstrādes tehnoloģijas enerģētiskās koksnes ražošanai. Salaspils, LVMI Silava. Pieejams: [http://www.silava.lv/userfiles/file/celmi\\_optim%20\(2\).pdf](http://www.silava.lv/userfiles/file/celmi_optim%20(2).pdf)
39. Lazdiņa, D. (2012). Augsnes sagatavošanas veida izvēles slāpju, kūdreņu un āreņu teorētiskais pamatojums, darbu ražīguma un pašizmaksas izpētē. Salaspils, LVMI Silava. Pieejams: [https://www.lvm.lv/images/lvm/Petijumi\\_un\\_publicacijas/Petijumi/PETIJUM\\_A\\_REZULTATU\\_ATSKAITE.\\_Augsnes\\_sagatavosanas\\_veida\\_izveles\\_slapjainos\\_kudreno.pdf](https://www.lvm.lv/images/lvm/Petijumi_un_publicacijas/Petijumi/PETIJUM_A_REZULTATU_ATSKAITE._Augsnes_sagatavosanas_veida_izveles_slapjainos_kudreno.pdf)
40. Lazdiņa, D., Lazdiņš, A., & Zimelis, A. (2012). Comparison of productivity of soil scarification with conventional excavator bucket and moulder MPV-600. *Mežzinātne*, 25(58), 131–134.
41. Lazdiņš, A. (2012). Multifunkcionālas celmu izstrādes un augsnes pacilu sagatavošanas iekārtas prototipa izveidošana un testēšana. Salaspils, LVMI Silava.
42. Lazdiņš, A. (2015). Mežsaimniecisko darbību ietekme uz siltumnīcefekta gāzu emisijām un CO<sub>2</sub> piesaisti. Salaspils, LVMI Silava. Pieejams: [https://www.lvm.lv/images/lvm/LVM\\_petijumi\\_un\\_publicacijas/CO2\\_20150520\\_1\\_copy.pdf](https://www.lvm.lv/images/lvm/LVM_petijumi_un_publicacijas/CO2_20150520_1_copy.pdf)
43. Lazdiņš, A. (2017). Meža darbu mehanizācija uz augsnēm ar mazu nestspēju. Salaspils, LVMI Silava.
44. Lazdiņš, A., & von Hofsten, H. (2009). Technical and environmental issues of stump harvesting for biofuel production in Latvia. Pieejams: <https://llu.lv/conference/Research-for-Rural-Development/2009/Pages%20from%20Research-for-Rural-Development-2009-Latvia-155-162.pdf>
45. Lazdiņš, A., Hofsten, H., Lazdiņa, D., & Lazdāns, V. (2009). Productivity and cost of stump harvesting for bioenergy production in Latvian conditions. *Engineering for Rural Development*, 8. Pieejams: [http://tf.llu.lv/conference/proceedings2009/Papers/33\\_Andis\\_Lazdins.pdf](http://tf.llu.lv/conference/proceedings2009/Papers/33_Andis_Lazdins.pdf)
46. Lazdiņš, A., Lazdāns, V., Gusarevs, I., Zimelis, A., Kurmis, E., Dmitrijenko, V., & Lazdiņa, D. (2014). Latvijas patents LV 14769 B. Latvijas patentu valde.
47. Lazdiņš, A., Lazdāns, V., Kalēja, S., Zimelis, A., Prindulis, U., Kļaviņa, D., & Rozītis, G. (2014). Celmu biokurināmā resursu un to pieejamības apskats egļu audzēs valsts mežos. *Mežzinātne*, 28(61), 166-179.
48. Lazdins, A., & Zimelis, A. (2012). Productivity of stump lifting head MCR-500. *Mežzinātne*, 25(58), 42–44.
49. Lazdiņš, A., & Zimelis, A. (2012). System analysis of productivity and cost of stump extraction for biofuel using MCR 500 excavator head. *Research for Rural Development*, 2, 7.



50. Lazdins, A., Zimelis, A., & Gusarevs, I. (2012). Preliminary data on the productivity of stump lifting head MCR-500. Latvia University of Agriculture. Pieejams: <http://web.a.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=d5aab191-eb21-4fbd-8479-331c4e6dfefa%40sessionmgr4008&vid=1&hid=4204>
51. Liepa, I., & Blija, T. (2008). Tree biomass structure of spruce forest in Latvia. *Proceedings of the Latvia University of Agriculture*, 2008. <http://llufb.llu.lv/proceedings/n20/3/LLU-proceeding-nr20-32-37.pdf>
52. Liepa, I., Miezīte, O., Luguza, S., Šulcs, V., Straupe, I., Indriksons, A., ... Dubrovskis, D. (2014). Latvijas meža tipoloģija. (Red. A. Grīnvalde). Jelgava: Studentu biedrība "Šalkone." Pieejams: [http://www.mf.llu.lv/sites/mf/files/files/articles/Meza\\_tipologija.pdf](http://www.mf.llu.lv/sites/mf/files/files/articles/Meza_tipologija.pdf)
53. Liepiņš, J. (2019). Kokaudžu biomasas noteikšanas metodikas izstrāde un oglekļa uzkrājuma aprēķini Latvijā. Salaspils, LVMI Silava. Pieejams: [http://www.silava.lv/userfiles/file/Aktualitates/2019\\_08\\_Liepiņš\\_J\\_promocijas\\_darba\\_kopsavilkums.pdf](http://www.silava.lv/userfiles/file/Aktualitates/2019_08_Liepiņš_J_promocijas_darba_kopsavilkums.pdf)
54. Liepiņš, J., Lazdiņš, A., & Liepiņš, K. (2017). Equations for estimating above- and belowground biomass of Norway spruce, Scots pine, birch spp. and European aspen in Latvia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2017, 1–13. <https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1337923>
55. Liepiņš, J., Liepiņš, K., & Lazdiņš, A. (2016). Estimation of the biomass stock from growing stock volume. In: Conference Proceedings "Students on their way to science". Jelgava, p. 120. Pieejams: [http://llufb.llu.lv/conference/Students\\_their\\_Way\\_Science/Latvia\\_11th\\_SWS\\_Collection\\_Abstracts\\_2016.pdf#page=120](http://llufb.llu.lv/conference/Students_their_Way_Science/Latvia_11th_SWS_Collection_Abstracts_2016.pdf#page=120)
56. Lincoln, S.F. (2005). Fossil Fuels in the 21<sup>st</sup> Century. *Ambio*, 34, 621–627. <https://doi.org/10.2307/4315666>
57. Lindhe, A., & Lindelöw, Å. (2004). Cut high stumps of spruce, birch, aspen and oak as breeding substrates for saproxylic beetles. *Forest Ecology and Management*, 203(1–3), 1–20. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2004.07.047>
58. Lindross, O., Henningsson, M., Athanassiadis, D., & Nordfjell, T. (2010). Forces required to vertically uproot tree stump. *Silva Fennica*, 44(4), 681–694.
59. LR Ekonomikas ministrija. (2013). Latvijas enerģētika skaitļos. Rīga. [http://85.254.195.240/images/stories/energetika/Brosura\\_Latvijas\\_energetika\\_skaitlos\\_2013\(1\).pdf](http://85.254.195.240/images/stories/energetika/Brosura_Latvijas_energetika_skaitlos_2013(1).pdf)
60. LR Ministru kabinets. (2000). Meža likums. Rīga. <https://likumi.lv/doc.php?id=2825>
61. LR Ministru kabinets. (2010). Meža likums. Latvijas Vēstnesis, 98/99 (ISO 9001:2015). Pieejams: <https://www.vestnesis.lv/ta/id/2825-meza-likums>
62. LR Ministru kabinets. (2016a). Oficiālās statistikas veidlapu paraugu apstiprināšanas... - *Latvijas Vēstnesis*, 251. Pieejams: <https://www.vestnesis.lv/op/2016/251.14>
63. LR Ministru kabinets. (2016b). Par Enerģētikas attīstības pamatnostādņēm 2016.–2020. gadam. *Latvijas Vēstnesis*, 32. <https://www.vestnesis.lv/op/2016/32.1>
64. LR Vides un reģionālās attīstības ministrija. (2006). Latvijas Republikas Ceturtais nacionālais ziņojums ANO. Rīga. Pieejams: [www.varam.gov.lv/files/text/Darb\\_jomas//4.nac\\_zin\\_lat.zip](http://www.varam.gov.lv/files/text/Darb_jomas//4.nac_zin_lat.zip)
65. Lundmark, T., Poudel, B.C., Stål, G., Nordin, A., & Sonesson, J. (2018). Carbon balance in production forestry in relation to rotation length. *Canadian Journal of Forest Research*, 48(6), 672–678. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2017-0410>
66. Mangoyana, R.B. (2011). Bioenergy from forest thinning: Carbon emissions, energy balances and cost analyses. *Renewable Energy*, 36(9), 2368–2373. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2011.01.026>
67. Marklund, L.G. (1988). Biomassfunktioner för tall, gran och björk i Sverige [Biomass functions for pine, spruce and birch in Sweden]. Sveriges lantbruksuniversitet,

- Institutionen for skogstaxering. Pieejams: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201300683879>
68. Moffat, A., Nisbet, T., & Nicoll, B. (2011). Environmental effects of stump and root harvesting.
  69. Morison, J., Matthews, R., Miller, G., Perks, M., Randle, T., Vanguelova, E., ... Yamulki, S. (2012). Understanding the carbon and greenhouse gas balance of forests in Britain. Research Report. Forestry Commission, UK (No. 018). Pieejams: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20123346717>
  70. Nordfjell, T., Athanassiadis, D., & Talbot, B. (2003). Fuel Consumption In Forwarders. *International Journal of Forest Engineering*, 14(2), 11–20. <https://doi.org/10.1080/14942119.2003.10702474>
  71. Nuutinen, Y., Petty, A., Bergström, D., Rytönen, M., Di Fulvio, F., Tiihonen, I., ... Dahlin, B. (2016). Quality and productivity in comminution of small-diameter tree bundles. *International Journal of Forest Engineering*, 27(3), 179–187. <https://doi.org/10.1080/14942119.2016.1223926>
  72. Palander, T., Smolander, J., & Kärhä, K. (2015). Work system study of three stump-lifting devices in Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 30(6), 558–567. <https://doi.org/10.1080/02827581.2015.1027731>
  73. Palosuo, T., Wihersaari, M., & Liski, J. (2001). Net greenhouse gas emissions due to energy use of forest residues – impact of soil carbon balance. *Wood Biomass as an Energy Source – Challenges in Europe*, 39, 114–121. Pieejams: [http://www.fefr.org/files/attachments/publications/proc39\\_net.pdf#page=115](http://www.fefr.org/files/attachments/publications/proc39_net.pdf#page=115)
  74. Pavļuts, D. (2013). Latvijas Enerģētikas ilgtermiņa stratēģija 2030 – konkurētspējīga enerģētika sabiedrībai. Rīga. Pieejams: [tap.mk.gov.lv/doc/2013/EMZino\\_210213\\_STRAT.378.doc](http://tap.mk.gov.lv/doc/2013/EMZino_210213_STRAT.378.doc)
  75. Poudel, B.C., Sathre, R., Bergh, J., Gustavsson, L., Lundström, A., & Hyvönen, R. (2012). Potential effects of intensive forestry on biomass production and total carbon balance in north-central Sweden. *Environmental Science & Policy*, 15(1), 106–124. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2011.09.005>
  76. Prinz, R., Spinelli, R., Magagnotti, N., Routa, J., & Asikainen, A. (2018). Modifying the settings of CTL timber harvesting machines to reduce fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions. *Journal of Cleaner Production*, 197, 208–217. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.06.210>
  77. Repo, A., Tuomi, M., & Liski, J. (2011). Indirect carbon dioxide emissions from producing bioenergy from forest harvest residues. *GCB Bioenergy*, 3(2), 107–115. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2010.01065.x>
  78. Repola, J. (2006). Models for Vertical Wood Density of Scots Pine, Norway Spruce and Birch Stems, and Their Application to Determine Average Wood Density. *Silva Fennica*, 40(4).
  79. Repola, J. (2008). Biomass Equations for Birch in Finland. *Silva Fennica*, 42(4).
  80. Rolfsson, H. (2006). On the clearcut the energy is bubbling. The stump gives twice as much as stem wood. Upsala.
  81. Rozītis, G., Zimelis, A., & Lazdiņš, A. (2017). Evaluation of productivity and impact on soil of tracked prosilva f2/2 forwarder in forest thinning. *Research for Rural Development*. <https://doi.org/10.22616/rrd.23.2017.014>
  82. Sarmulis, Z., & Saveljevs, A. (2015). Meža darbi un tehnoloģijas. Jelgava. LLU Meža fakultāte. Jelgava; Studentu biedrība “Šaklkone”.
  83. Sirén, M., & Aaltio, H. (2003). Productivity and Costs of Thinning Harvesters and Harvester-Forwarders. *International Journal of Forest Engineering*, 14(1), 39–48. <https://doi.org/10.1080/14942119.2003.10702468>
  84. Straupe, I. (2015). Integrētās meža apsaimniekošanas tehnoloģiju izpēte. Jelgava.

85. Talbot, B., Nordfjell, T., & Suadicani, K. (2003). Assessing the Utility of Two Integrated Harvester-Forwarder Machine Concepts Through Stand-Level Simulation. *International Journal of Forest Engineering*, 14(2), 31–43.  
<https://doi.org/10.1080/14942119.2003.10702476>
86. Tiernan, D., Zeleke, G., Owende, P.M.O., Kanali, C.L., Lyons, J., & Ward, S.M. (2004). Effect of Working Conditions on Forwarder Productivity in Cut-to-length Timber Harvesting on Sensitive Forest Sites in Ireland. *Biosystems Engineering*.  
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.11.009>
87. Wasiak, A. (2018). Modeling Energetic Efficiency of Biofuels Production. Springer.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-98431-5>
88. Zimelis, A., Lazdāns, V., & Lazdiņa, D. (2012). Evaluation of forest regeneration results after stump extraction in joint stock company “Latvian state forests”. *Research for Rural Development*.
89. Zimelis, A., Lazdiņš, A., & Sarmulis, Z. (2013). Comparison of productivity of CBI and MCR-500 stump lifting buckets in Latvia. *Research for Rural Development*, 2, 59–65.
90. Zimelis, A., Sarmulis, Z., & Lazdiņš, A. (2014). Productivity of stump extraction with MCR500 bucket in Latvia. *Proceedings in ARSA - Advanced Research in Scientific Areas*, 3, p. 4). EDIS – Publishing Institution of the University of Zilina. Pieejams: <http://www.arsa-conf.com/archive/?vid=1&aid=2&kid=60301-50>
91. Zimelis, A., Sisenis, L., Sarmulis, Z., & Ariko, S. (2018). Technology and energy balance in stump harvesting with MCR500. *Engineering for Rural Development*, 17.  
<https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N162>
92. Савич, В.Л. (2013). Обоснование основных параметров оборудования для виброкорчевки пней и целых деревьев: автореф. дис. канд. техн. наук.: 05.21.01. Петрозаводск, 24 с.
93. Савич, В.Л., & Солдатенков, В.И. (2009). К вопросу определения удельных затрат и производительности машины при корчевке пней вертикальным способом // Сборник научных трудов: материалы науч.-техн. конф., Ухта, 14–17 апр. 2009 г. Ухта, УГТУ, с. 80–82.
94. Сянев, В. (2014). Энергетическое использование древесной биомассы. Pieejams: [www.idanmetsatieto.info/tiedostot/.../uchebnik\\_bioenergetika\\_sec1.pdf%0A%0A](http://www.idanmetsatieto.info/tiedostot/.../uchebnik_bioenergetika_sec1.pdf%0A%0A).