



Latvijas Lauksaimniecības universitāte
Meža fakultāte
Meža izmantošanas katedra

Latvia University of Agriculture
Forest Faculty
Forest Utilization Department

Mg.sc.ing. JĀNIS PĒTERSONS

**MAŠINIZĒTAS MEŽIZSTRĀDES TEHNOLOĢIJAS
IZPĒTE KRĀJAS KOPŠANAS CIRTĒS**

**RESEARCH ON MACHINE OPERATED LOGGING
TECHNOLOGY IN COMMERCIAL THINNINGS**

Promocijas darba KOPSAVILKUMS
Inženierzinātņu (Dr.sc.ing.) zinātniskā grāda iegūšanai

SUMMARY of the Doctoral Thesis
For the PhD sc.ing. in Forestry science



Jelgava 2014

Promocijas darba zinātniskais vadītājs:
Academic adviser:

Prof. Dr.sc.ing. **Andris Drēska**
Dr.sc.ing. **Aleksandrs Saveljevs**

Darbs izpildīts Latvijas Lauksaimniecības universitātes (LLU) Meža fakultātē, Meža izmantošanas katedrā. Pētījumi veikti laika posmā no 2007. līdz 2014. gadam.

The research has been carried out at Latvia University of Agriculture (LUA), Faculty of Forestry. The studies have been performed in the period between 2007-2014.

Oficiālie recenzenti/ Official reviewers:

- prof., Dr. habil. biol. **Imants Liepa**, Latvijas Zinātnes padomes eksperts, LLU Mežzinātnes nozares un Materiālzinātņu nozares Koksnes materiālu un tehnoloģijas apakšnozares promocijas padomes loceklis / *professor of LUA, expert of Latvian Council of Science, member of the Promotion Council of Forest Sciences and Material Sciences (sub-branch of Wood Materials and Technology) of LUA;*
- Dr.sc.ing. **Māris Daugavietis**, LVMI “Silava” vadošais pētnieks / *leading researcher*
- PhD (CSc) **Lubmoir Novak**, Čehijas Mendelovas universitātes (Brno), Meža mācību un pētniecības stacijas direktors / *Director of Forest research station, Mendel University (Brno).*

Darba izstrāde un noformēšana veikta ar ESF grantu atbalstu.

The doctoral thesis has been worked out by financial support of ESF.



Promocijas darba aizstāvēšana notiks LLU Mežzinātņu nozares un Materiālzinātņu nozares Koksnes materiālu un tehnoloģijas apakšnozares promocijas padomes atklātajā sēdē 2014. gada 3. decembrī, plkst. 10:30 Jelgavā, Dobeles ielā 41, sēžu zālē.

The Promotional paper will be presented for public criticism in an open session of the Promotion Council of Forest Sciences and Material Sciences (sub-branch of Wood Materials and Technology) of LUA held on December 3, 2014, at 10:30 a.m. in the Conference hall, Dobeles street 41, Jelgava.

Ar promocijas darbu un kopsavilkumu var iepazīties LLU Fundamentālajā bibliotēkā / *The thesis and resume are available at the Fundamental Library of LUA, Lielā iela 2, Jelgava, LV-3001 vai / or http://lufb.llu.lv/promoc_darbi.html.*

Atsauksmes sūtīt promocijas padomes sekretārei Dr.silv. I. Jankovskai / *References are welcome to be sent to DR.silv. I. Jankovska, the Secretary of the Promotion Council: Akadēmijas iela 11, Jelgava, LV-3001, Latvija vai / or: ilze.jankovska@llu.lv.*

ISBN 978-9984-48-167-8 (online)

SATURS

DARBA APROBĀCIJA.....	4
DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	6
1. SITUĀCIJAS ANALĪZE.....	8
2. PĒTĪJUMU MATERIĀLS UN METODIKA	10
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA	15
4. PROJEKTI UN JAUNIEVEDUMI	23
SECINĀJUMI UN PRIEKŠLIKUMI.....	29

CONTENT

APPROBATION OF THE RESEARCH.....	4
GENERAL CHARACTERISTICS OF THE RESEARCH.....	31
1. SITUATION ANALYSIS	33
2. MATERIALS AND METHODS.....	34
3. RESULTS AND DISCUSSION.....	38
4. PROJECTS AND NOVELTIES.....	41
CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS	46

DARBA APROBĀCIJA

APPROBATION OF THE RESEARCH

Publikācijas par promocijas darba tēmu

Publications related to the theme of the thesis

1. Pētersons J. (2010) *Factors Affecting Harvester Productivity in Forest Thinning in Latvia*. In: Proceedings of the Annual 16th International Scientific Conference of the Research for Rural Development 2010, Jelgava, LLU, 2010. Volume 1. P. 183 – 187. (AGRIS, CAB ABSTRACTS, CABI, EBSCO, Thomson Reuters Web of Science, SCOPUS).
2. Petersons J. (2010) *Productivity of Harvesters and Quality of Remaining Stands in Commercial Thinning in Latvia*. Proceedings of the 2010 OSCAR conference on Forest Operations Research in the Nordic Baltic Region. Honne, Norway, 2010. P. 77 – 79.
3. Pētersons J., Drēška A., Saveljevs A. (2010) *Izvērtējums koku aizsniēšanas faktoru un paliekošās audzes koku kvalitātes izvērtējums krājas kopšanas cirtes mašinizētā izstrādē*. Mežzinātne 22(55) 2010: 116 – 128.lpp. (CAB Abstracts; AGRIS).
4. Pētersons J., Saveljevs A., Ševčuks K. (2014) *Quality Control Improvement of Harvesters in Commercial Thinning*. In: Proceedings of the 13th International Scientific Conference of the Engineering for Rural Development 2014, Jelgava, LLU, TF, 2014. Volume 1. P. 565 – 570. (AGRIS, CAB ABSTRACTS, CABI, EBSCO, Thomson Reuters Web of Science, SCOPUS).
5. Петерсонс Я., Дреска А. (2014) *Исследование влияния состава насаждения на производительность харвестера при проведении рубак ухода*. Труды БГТУ, 2014. N. 2., Минск, С. 45-47.

Publicēšanai iesniegtie raksti

Scientific articles submitted for publication

1. Pētersons J. (2014) *Productivity of Harvesters in Commercial Thinning in the Forest Stands of Different Composition of Species*. In: Proceedings of the Annual 20th International Scientific Conference of the Research for Rural Development 2014, Jelgava, LLU, 2014. (AGRIS, CAB ABSTRACTS, CABI, EBSCO, Thomson Reuters Web of Science, SCOPUS). Raksts pieņemts publicēšanai 15.09.2014.
2. Pētersons J. (2014) *Koku kvalitātes novērtējums mežaudzē pēc mašinizētas krājas kopšanas*. In: Proceedings of the 56th International Scientific Conference of Daugavpils University, Daugavpils, DU, 2014. Raksts iesniegts publicēšanai 28.05.2014.

3. Pētersons J., Drēška A. (2014) *Harvestera darba ražīgums krājas kopšanas cirtēs un izcērtamo koku vidējie stumbru tilpumi dažāda sugu sastāva audzēs*. Mežzinātne 2014. (CAB Abstracts; AGRIS). Raksts pieņemts publicēšanai 14.07.2014.
4. Pētersons J., Saveljevs A., Ševčuks K. (2014) *Harvestera darba kvalitātes kontroles iespēju uzlabošana krājas kopšanas cirtēs*. Mežzinātne 2014. (CAB Abstracts; AGRIS). Raksts iesniegts publicēšanai 30.03.2014.

Dalība zinātniskajās konferencēs unursos

Participation in scientific conferences and courses

1. Zinātniski praktiskā konference „Zinātne un prakse nozares attīstībai”, LLU, MF, Jelgava, 2008. 17.aprīlis, referāts: *Harvestera darba procesa īpatnību novērtējums krājas kopšanas cirtēs*.
2. NOVA PhD course „Multifunctional Forestry 2008”, Kopenhāgena, Dānijas Dabas zinātņu fakultāte, Zviedrija, Zviedrijas mežsaimniecības departaments 2008. gada 9. – 13. jūnijs. / 2.daļa, Tartu, Igaunijas Dabas zinātņu fakultāte 2008. gada 19. – 24. oktobris.
3. Annual 16th International Scientific Conference „Research for Rural Development 2010”, Jelgava, Latvija, 2010. gada 19. – 21. maijs, referāts: *Factors Affecting Harvester Productivity in Forest Thinning in Latvia*.
4. OSCAR 2010 conference „Forest Operations Research in the Nordic Baltic Region”, Honne, Norvēģija, 2010. gada 20. – 22. oktobris, referāts: *Productivity of Harvesters and Quality of Remaining Stands in Commercial Thinning in Latvia*.
5. 78-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Minska, Baltkrievija, 2014. gada 4. – 6. februāris, referāts: *Оценка производительности харвестера на проходных рубках в Латвии*.
6. The 56th International Scientific Conference of Daugavpils University, Daugavpils, Latvija, 2014. gada 9. – 10. aprīlis, referāts: *Koku kvalitātes novērtējums mežaudzē pēc mašinizētas krājas kopšanas*.
7. Annual 20th International Scientific Conference „Research for Rural Development 2014”, Jelgava, Latvija, 2014. gada 21. – 23. maijs, referāts: *Productivity of Harvesters in Commercial Thinning in the Forest Stands of Different Composition of Species*.
8. The 13th International Scientific Conference „Engineering for Rural Development 2014”, Jelgava, Latvija, 2014.gada 29. – 30. maijs, referāts: *Quality Control Improvement of Harvesters in Commercial Thinning*.

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Darba aktualitāte

Mežs kā ekoloģiska sistēma savā attīstības ciklā iziet vairākus etapus. Viens no būtiskākajiem ir vidējā vecuma etaps, kad jaunā mežaudze pārtop pieaugušā mežā. Vēsturiski ilgi valdīja uzskats, ka šajā laikā mežaudzes augšana ir pašpietiekama un cilvēka līdzdalība šajā procesā nav nepieciešama. Daži mežkopji gan ieteica vairākus priekšlikumus, piemēram, veidot mežaudzes, pielietojot ciršanas paņēmienus, tomēr dominēja viedoklis, ka koku izciršana pirms cirtmeta nav vajadzīga.

Rietumeiropā pirmās koksnes deficīta pazīmes īpašu uzmanību lika pievērst mežam kā bagātīgam un perspektīvam koksnes ieguves resursam visā tā augšanas periodā. Tika konstatēts, ka, mežam attīstoties, koku skaits laikā no jaunaudzes vecuma līdz pieaugušam mežam var samazināties pat 15 reizi - no 10-15 tūkstošiem koku uz hektāra līdz pat 400 - 800 kokiem uz hektāra, ko veicina koku savstarpējā konkurence, kā arī meža kaitēkļu un slimību ietekme.

Lai kompensētu koksnes deficītu, mežkopji augšanā atpalikušos kokus sāka izcirst, nosaucot šo darbības veidu par kopšanas cirti. Ar laiku uzskati par mežkopību mainījās, un tika atzīts, ka, pielietojot kopšanas cirtes, var sekmīgi veidot mežu un iegūt arī papildus koksni tautsaimniecības vajadzībām. Krājas kopšana veicina koku kvalitātes uzlabošanu, nodrošinot tiem plašāku augšanas telpu. Krājas kopšanas mērķis – gūt maksimālus ienākumus no meža audzēšanas. Krājas kopšanas cirtēs izvācami nevēlamo sugu koki, tāpat galvenās sugas slimie, bojātie un nomāktie, mazvērtīgie starpauzdes koki un, ja normatīvi pieļauj, arī koki no galvenās audzes (Bušs, 1981). Rezultātā visās attīstītās mežkopības valstīs tika izstrādāti atsevišķiem meža augšanas apstākļu tipiem piemēroti mērķu audžu modeļi.

Līdz pat 20. gadsimta 60.–70. gadiem krājas kopšanas cirtes izstrādāja nemehanizēti, izmantojot rokas zāģus un zirgvilkmi (Saliņš, 1997). Aktīva un plaša jaunu mašīnu, mehānismu un tehnoloģiju ieviešana mežizstrādē veicināja arī kopšanas ciršu izpildi. Mežizstrādes tehnikas pielietošanas rezultātā tika atzīts, ka nav tādas universālas tehnikas, kas būtu piemērota gan lielo, pieaugušo koku izvākšanai galvenajā izmantošanā, gan sīko dimensiju koku izciršanai kopšanas cirtēs.

Paralēli mašinizācijas ieviešanai mežizstrādes darbos aizsākās meža mašīnu pielietošanu ietekmējošo faktoru izpēte. Galvenās izmantošanas cirtēs mašinizētās tehnoloģijas uzdevums ir nodrošināt ātru un efektīvu izcērtamo koku apstrādi un tehnikas pārvietošanos apgrūtinātajos braukšanas apstākļos. Savukārt, izdarot kopšanas cirtes, ir īpaši svarīgi, lai paliekošā audzes daļa būtu vesela, novēršot iespējamās augšnes, kā arī atstājamo koku stumbru un sakņu bojājumus, tādā veidā radot optimālus augšanas apstākļus mērķa audzes turpmākajai attīstībai.

Plašu mašinizētās mežizstrādes pielietošanu krājas kopšanas cirtēs joprojām kavē vairāki ekonomiskie un mežsaimnieciskie faktori: rūpnieciska apjoma izstrādes ražīguma rādītāji nav pietiekami augsti, bieži netiek ievērotas mežsaimniecisko un ekoloģisko normatīvu prasības.

Promocijas darba mērķis

Darba mērķis ir izpētīt mašinizētās mežizstrādes tehnoloģiju pielietošanu krājas kopšanas cirtēs Latvijā un izstrādāt rekomendācijas minētās tehnoloģijas uzlabošanai.

Pētnieciskie uzdevumi:

1. noskaidrot kādi faktori ietekmē harvestera darba ražīgumu krājas kopšanas cirtēs;
2. izvērtēt koku aizsniedzamību harvestera tipa mašīnām krājas kopšanas cirtēs;
3. novērtēt ar harvesteru izkoptās audzes kvalitāti;
4. formulēt koku aizsniedzamības modeļa darbības principus mežizstrādes mašīnai;
5. izstrādāt ieteikumus mašinizētas mežizstrādes tehnoloģijas uzlabošanai krājas kopšanas cirtēs.

Pētījuma ietvaros pārbaudīta šāda hipotēze:

izpētot un pilnveidojot mašinizētas mežizstrādes tehnoloģiju krājas kopšanas cirtēs, iespējams uzlabot izkopto mežaudžu kvalitāti, nodrošinot vienmērīgāku atstāto koku izvietojumu.

Zinātniskā novitāte

Darbā ir apkopoti plaša mēroga pētījumi par harvestera darbu krājas kopšanas cirtēs. Pēdējos 25 gados Latvijā tik vispusīgi pētījumi netika veikti. Darbs ir kā turpinājums mežizstrādes mašīnu koku aizsniedzamības teorijai, kuru pagājušā gadsimta 70-to gadu beigās veica zinātniece Tea Roziņa un 80-to gadu beigās turpināja Aleksandrs Saveljevs. Pētījumos iegūtie rezultāti parāda pašreiz pielietotās mežizstrādes tehnoloģijas nepilnības, kā arī rasti risinājumi to novēršanai.

Darba praktiskā nozīme

Balstoties uz veiktajiem pētījumiem, šajā darbā piedāvāti divi jaunievedumi:

1. izvācamo koku uzskaites ierīce harvesteram, kuras ieviešana praksē nodrošinātu augstāku darba ražīgumu un darba kvalitāti, kā arī mežaudzes vienmērīgāku izkopšanu;
2. matemātiski pamatotais mežizstrādes mašīnas izvācamo koku aizsniedzamības modelis, ar kura aprēķinu rezultātiem harvestera operatoram būtu nosakāmi optimālākie pārbraucienu attālumi katrā konkrētajā cirsma daļā.

Promocijas darba struktūra un apjoms

Darbs strukturēts 4 nodaļās:

1. Situācijas analīze, kurā raksturots krājas kopšanas ciršu potenciāls Latvijā, vēsturisks ieskats izstrādes mašinizācijas attīstībā kā arī pašreizējā kopšanas ciršu izstrādes tehnoloģija. Papildus veikts ieskats ārzemju autoru pētījumos saistībā ar harvestera ražīguma ietekmējošiem faktoriem un izvācamo koku aizsniedzamību kopšanas cirtēs strādājošajiem harvesteriem.
2. Pētījumu materiāls un metodika. Nodaļā raksturoti dažādi eksperimentu veidi un pētījumu datu ievākšanas metodika. Sniegta informācija par parauglaukumiem, pētījumos izmantotajiem harvesteriem kā arī datu apstrādei izmantotām metodēm.
3. Rezultāti un diskusija. Šī nodaļa sastāv no trīs apakšnodaļām, apskatīti rezultāti no vairākiem harvestera darba ražīguma pētījumiem, koku aizsniedzamības pētījumiem, kā arī no izkoptās audzes kvalitātes novērtējuma.

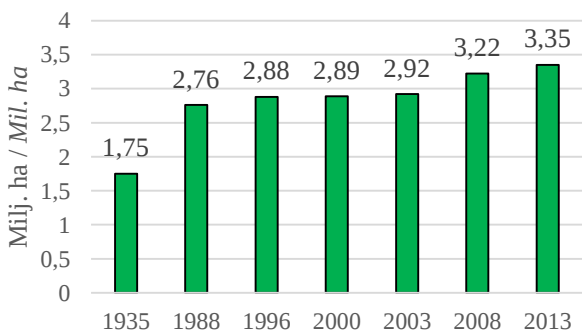
- Projekti un jaunievedumi. Nodaļā aprakstīts jaunievedums – izvēcamo koku uzskaites ierīce harvesteram, kā arī matemātiski pamatots mežizstrādes mašīnas izvēcamo koku aizsniedzamības modelis.

Kopumā darbs noformēts uz 92 lappusēm; informācija apkopota 14 tabulās un 51 attēlā; izmantoti 124 zinātniskās literatūras avoti. Darba noslēgumā formulēti 9 secinājumi un 2 priekšlikumi mašinizētas mežizstrādes tehnoloģijas uzlabošanai.

1. SITUĀCIJAS ANALĪZE

Latvijas teritorija aizņem 6.46 milj. ha, savukārt mežu kopplatība - 3.35 milj. ha, kas sastāda 52 % no valsts teritorijas. Turklāt mežu platības pēdējos gados turpina palielināties. Salīdzinājumā ar citām Eiropas valstīm, Latvija ir viena no mežiem bagātākajām. Eiropā meži vidēji aizņem 33% no sauszemes teritorijas. Kokiem augot, ik gadu veidojas koksnes pieaugums, kas pēc pašreizējiem datiem Latvijā ir 16.5 milj. m³ gadā. Latvija ierindojama starp vadošajām Eiropas mežsaimniecības valstīm, ar aptuveni 1.2 hektāriem meža zemes uz vienu iedzīvotāju (Eiropā vidēji uz vienu iedzīvotāju ir 0.27 ha meža zemes). Lielāks šādu zemju apjoms ir tikai Somijā, Zviedrijā, Norvēģijā un Igaunijā (LVMI Silava, 2013).

Latvijas klimatiskie un ģeogrāfiskie apstākļi ir labvēlīgi meža augšanai: tādēļ viena kubikmetra koksnes ieguves pašizmaksa ir 1.3 reizes zemāka nekā Skandināvijas valstīs. No pagājušā gadsimta sākuma līdz pat mūsdienām Latvijā ar mežu aizņemtās platības joprojām palielinās (1.1. attēls). Meža platību un audžu krājas pieaugums ir nozīmīgi ilgtspējīgu meža apsaimniekošanu raksturojoši rādītāji.



1.1. att. Meža platību dinamika Latvijā¹.

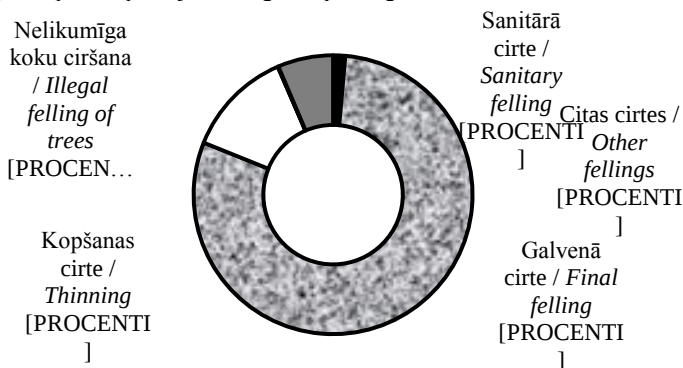
Fig. 1.1. Dynamics of forest covered area in Latvia¹.

Meža platību palielināšanās galvenokārt skaidrojama ar koku dabisku ieviešanos neizmantotajās lauksaimniecības zemēs, kā arī ar lauksaimniecības zemju mākslīgu apmežošanu. Pēc meža statistiskās inventarizācijas datiem šādas izmaiņas notikušas pēdējo 40 gadu laikā (īpaši pēdējos 10 gados), kad ik gadu ar kokaugiem

¹ Pēc meža statistiskās inventarizācijas datiem, (LVMI Silava, 2013)
According to forest statistical inventory data, (LVMI Silava, 2013)

aizaug aptuveni 66 tūkstoši hektāru neapsaimniekoto lauksaimniecības zemju. Meža platību palielināšanos veicina arī mērķtiecīga meža ieadzēšana. Kopumā, kopš pagājušā gadsimta sākuma, mežu platības Latvijā palielinājušās gandrīz divkārt, pēdējo divdesmit gadu laikā - par 19 % (LVMI Silava, 2013).

Latvijā maksimāli pieļaujamais ciršanas apjoms kopšanas cirtēs nav ierobežots. Meža likums nosaka, ka krājas kopšanas cirtē ir atļauta gadījums, kad mežaudzes šķērslaukums ir lielāks par minimālo šķērslaukumu vai arī tad, ja mežaudzē ir slimību inficēti, kaitēkļu invadēti vai citu iemeslu dēļ bojāti koki, un ja pēc cirtes mežaudzes šķērslaukums nekļūst mazāks par minimālo šķērslaukumu. Latvijas meža apsaimniekošanas cikls krājas kopšanas cirti katrai mežaudzei paredz veikt 2 – 3 reizes, to atkārtot ik pēc 20 gadiem. Pirmā krājas kopšana izdarāma, konkrētajai mežaudzei sasniedzot 20 – 30 gadu vecumu, un to vajadzētu atkārtot ik pēc 15 – 20 gadiem. Pēdējā krājas kopšana parasti plānojama 20 gadus pirms galvenās cirtes.



1.2. att. Koku ciršanas apjoms sadalījumā pa ciršu veidiem 2013. gadā².

Fig. 1.2. The volume of fellings by felling types in 2013².

1.2. attēla dati liecina, ka Latvijā 2013. gadā 12.4 % no kopējā koksnes apjoma sastāda krājas kopšanas cirtēs izstrādātā un realizētā koksne. Lielākā daļa – 79.7 % no kopējā koksnes apjoma - iegūta galvenajā cirtē, bet atlikušie 7.9 % - veicot pārējās cirtes.

Līdz 2005. gadam krājas kopšanas cirtēs Latvijā nebija iespējama harvesteru pielietošana, jo, saskaņā ar Ministru Kabineta (MK) Noteikumiem Nr.217, kopšanas cirtēs ierīkoto tehnoloģisko koridoru kopējā platība nedrīkstēja pārsniegt 12% no audzes platības. Līdz ar to attālumi starp koridoriem nebija pieļaujami mazāki par 30 m, un tādēļ harvesteru izlīces garums nespēja nodrošināt vienmērīgu audzes izkopšanu starp diviem koridoriem visā meža slejas platībā. Lai situāciju labotu, 2005. g. 15. martā tika izdarītas izmaiņas minētajos MK Noteikumos, kas pieļāva tehnoloģisko koridoru ierīkošanai izmantot līdz 20% no mežaudzes kopplatības. Līdz ar to tehnoloģiskos koridorus varēja izveidot ik pēc 20 m, kas būtiski paaugstināja harvesteru pielietošanas efektivitāti kopšanas cirtēs, nodrošinot visu paredzēto koku izzāģēšanu un pievilkšanu pie tehnoloģiskajiem koridoriem, kā arī apaļo sortimentu sagatavošanu.

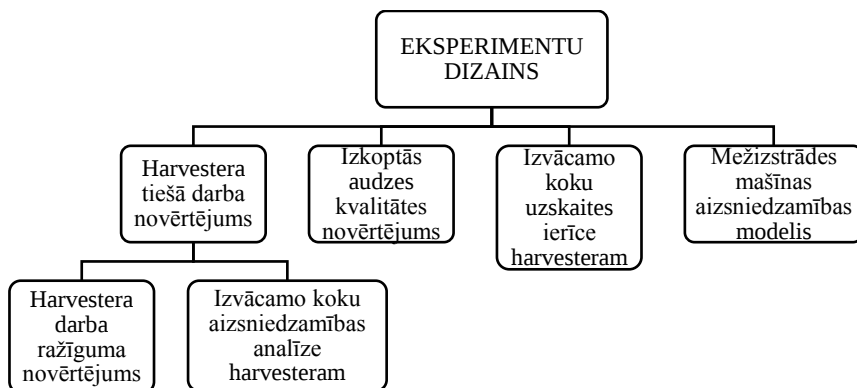
² Pēc meža statistiskās inventarizācijas datiem, (LVMI Silava, 2013)
According to forest statistical inventory data, (LVMI Silava, 2013)

2. PĒTĪJUMU MATERIĀLS UN METODIKA

No 1. nodaļas situācijas analīzes izriet, ka mašinizētas mežizstrādes tehnoloģijas pielietojums krājas kopšanas cirtēs ir samērā sarežģīts un komplicēts process. Tajā iesaistītas dārgas un inovatīvas mežizstrādes mašīnas un to operatori, kuriem jāprot ne tikai profesionāli tās vadīt, bet arī jāapgūst mežkopības pamatjautājumi un jāzina, kā sagatavojama kvalitatīva, prasībām atbilstoša apaļkoksne. Turklāt minēto uzdevumu izpildi mežizstrādē zināmā mērā ierobežo MK noteikumi un vairāki likumdošanas akti.

Nemot vērā iepriekš minēto, šajā darbā pēģināta mežizstrādes tehnoloģijas pielietošana harvestera darbā krājas kopšanas cirtēs. Mazāk uzmanības veltīts sortimentu pievešanai, kas uzskatāma par vienkāršāku mežizstrādes procesa posmu.

Veikto eksperimentu dizaina raksturojums skatāms 2.1. attēlā.



2.1. att. Promocijas darba eksperimentu dizaina raksturojums.

Fig. 2.1. The design characteristics of the experiments conducted.

Kā redzams 2.1. attēlā, darba pētījumi iedalīti četrās lielās grupās:

1. harvestera tiešā darba novērtējums, kas sīkāk sadalīts darba ražīguma novērtējumā un izvācamo koku aizsniedzamības analīzē;
2. izkoptās audzes kvalitātes novērtējums pēc mašinizētās mežizstrādes;
3. izvācamo koku uzskaites ierīce harvesteram;
4. mežizstrādes mašīnas koku aizsniedzamības modelis. Ar matemātiskām metodēm un datorprogrammu izstrādāts vizuāls mežaudžu modelis, kas aptver mašinizētu kopšanas ciršu tehnoloģiju harvesteram un dažādās situācijās izvācamo koku aizsniedzamības aprēķinus.

Pētījumā izmantotie dati ievākti laikā no 2007. gada līdz 2014. gadam: 2008. gadā apsektas ≈ 200 krājas kopšanas cirsmas dažādās mežizstrādes darbu izpildes

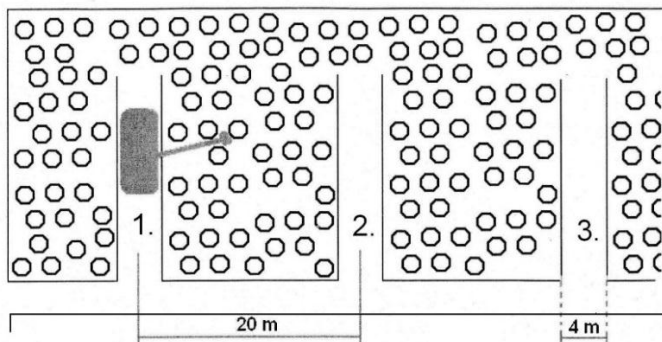
stadijās, no sākuma fāzes – kokmateriālu sagatavošanas, līdz beigu fāzei – apaļkoksnes sortimentu pievešanai. Papildus veikti kontrolmērījumi, kā arī dažādi novērojumi. Informācija pētījumu pamatbāzei iegūta 12 dažādās krājas kopšanas cismās, kur ierīkotas 660 parauglaukumu kopas. Izmēģinājumus izmantoti 3 Latvijā populārāko marku un modeļu kopšanas ciršu harvesteri: John Deere 1070, Ponsse Beaver un Valmet 901.4. Atšķirīgi veikts harvestera ražības pētījums saistībā ar audzes raksturojumu: izmantoti harvesteru darba laika uzskaites faili no 100 dažādām krājas kopšanas cismām, kas atrodas Latvijas teritorijas dažādās vietās.

Pētījumu rezultātā iegūtie dati apkopoti un statistiski apstrādāti, pamatā izmantojot datorprogrammu SPSS 17 un MS Excel. Lai pilnībā realizētu pētījuma mērķuzdevumus, veikti T-testi, dispersijas un korelācijas analīzes.

Pētījumi 2008. gadā un 2009. gadā veikti 12 dažādās mašinizēti ar harvesteru izstrādātās krājas kopšanas cismās, kas atlasītas ģeogrāfiski dažādās Latvijas vietās – AS LVM Zemgales un Vidusdaugavas mežsaimniecības teritorijā.

Visās pētāmajās cismās koku izvietojums ir izklaidēts. Audzes, kur koki izvietoti rindās, šajā darbā nav pētītas. Kā izpētes objekti – cirsma sadalīta pa meža tipiem (2.2. attēls): attēlā uzskatāmi redzams, ka pārsvarā visas izraudzītās cirsma atrodas sausieņu mežu tipos. Tas darīts ar nolūku, lai izslēgtu dažādus blakus faktorus, kas varētu ietekmēt harvesteru darbu izmēģinājumos un līdz ar to arī pētījuma rezultātus.

Pirms izstrādes katra cirsma sagatavota, atbilstoši pētījuma specifikai un izvirzītajiem mērķuzdevumiem. Vispirms pēc tradicionālās shēmas iezīmēti tehnoloģiskie koridori – 20 m starp tehnoloģisko koridoru centriem, tehnoloģisko koridoru platums - 4.0 m. Lai izpēti veiktu racionāli, visu 12 cirsma konfigurācija ir taisnstūrveida, kas vienkāršo atsevišķu izmēģinājumu veikšanu. Cirsma shēma un tehnoloģisko koridoru izstrādes secība skatāma 2.2. attēlā.

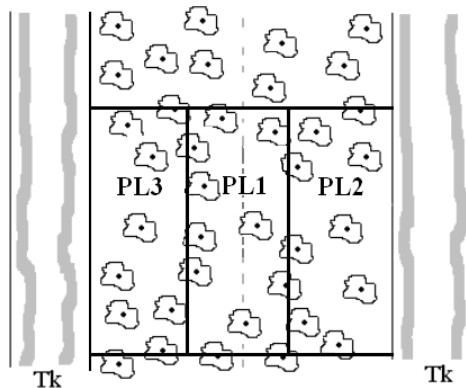


2.2. att. Tehnoloģisko koridoru izstrādes secība izmēģinājumu cismās.

Fig. 2.2. The sequence of strip road logging in experimental felling sites.

Pēc šāda veida cirsmu izstrādes izkoptajā audzē ierīkoti taisnstūrveida parauglaukumi; katra platība 100 m² (2.3. att.):

- divi malējie – PL2 un PL3;
- centrālais parauglaukums, kas atrodas pusslejas vidusdaļā – PL1.



2.3. att. Parauglaukumu izvietojuma shēma.

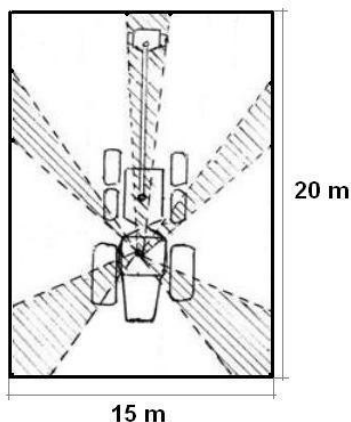
Fig. 2.3. The layout of the sample plot location.

Visās pētījumā iekļautajās cirmās parauglaukumi un tehnoloģiskie koridori ierīkoti tā, lai parauglaukums PL3 atrastos tajā pusslejā, kuru harvesters izstrādā uz nekoptās audzes pusi, turpretī parauglaukums PL2 – pusslejā, kuru izstrādā uz izkoptās audzes pusi.

Veidojot parauglaukus, mežaudzes sleja starp tehnoloģiskajiem koridoriem sadalīta trīs vienādās daļās. Pārsvārā slejas platums ir 16.0 m, un līdz ar to katra parauglaukuma malas garums – 5.3 m. Lai parauglaukuma platība sastādītu 100 m², otras malas garums ir 18.87 m. Ja kādā no cirsmas parauglaukuma vietām slejas platums ir lielāks vai arī mazāks, tad attiecīgi rindas malas garums noteikts tāds, lai katra parauglaukuma platība visos gadījumos būtu 100 m².

Lai noteiktu koku aizsniedzamību harvesteram, veikts:

- 1) pārredzamības novērtējums no dažādu marku harvesteru kabīnēm;
- 2) harvestera darba novērtējums sagatavotajās cirmās;
- 3) harvestera darba novērtējums pie dažādiem stāvpunktu attālumiem.



2.4. att. Pārredzamības noteikšana ar „ēnu” metodi.

Fig. 2.4. Determining the range of visibility by "shadow" method.

Pārredzamības novērtēšanai no dažādu harvesteru kabīnēm, pielietotas tradicionālās 1974. – 1976. g. izstrādātās „ēnu” metodikas - ГОСТ 12.2.002-74 un ГОСТ 12.2.019-76. Eksperimentos izmantoti trīs dažādu marku un konstrukciju kopšanas ciršu harvesteri – Valmet 901.4, Ponsse Beaver un John Deere 1070d, ar atšķirīgu kabīņu un hidromanipulatoru izvietojumu. Izmēģinājums veikts diennakts tumšajā laikā, katra modeļa harvesteram atrodies stacionārā stāvpunktā, ārpus mežaudzes. Pēc tam ap harvesteru ar 4 mietiņiem nosprausts taisnstūra laukums - 15 x 20 m – tā, lai harvesters būtu laukuma centrā (2.4. att.). Harvestera kabīnes vidū, operatora galvas augstumā, tika piestiprināts spēcīgs gaismas avots – spuldze. Atkal izmantojot mietiņus, apspraustas taisnstūra laukuma malu apēnotās daļas un uzmērīts to lielums.

Iegūtā informācija ievadīta datorprogrammā SPSS 17, un katram harvestera modelim izskaitļotas kopējās apēnotās un redzamās laukuma daļas.

Harvestera darbs novērtēts visās divpadsmit cismās, īpaši sagatavojot mežaudžu pusslejas starp tehnoloģiskajiem koridoriem. Pirms izstrādes, ievērojot mežsaimnieciskās prasības un konkrētajai audzei paredzēto kopšanas modeli, katram otrajam koridoram piegulošajās pusslejās ar luminiscējošu krāsu iezīmēti izvācamie koki (2.6. att. II. un IV. koridors), un tādēļ iespēja, ka harvestera operators kādu izvācamo koku varētu nepamanīt, ir maz ticama. Vienlaicīgi ar izvācamo koku marķēšanu, fiksēts arī to skaits. Katram operatoram, pirms mežizstrādes uzsākšanas visās sagatavotajās cismās izskaidrots, lai, izvācot tikai marķētos kokus, darbs tiktu izpildīts pēc zināmās tehnoloģijas un ierastajā tempā. Darbu beidzot, atkal apsekotas iezīmētās cismu daļas un izskaitīti neizvāktie marķētie koki. Tad iegūtie dati ievadīti MS Excel elektroniskajās tabulās un aprēķināts, cik % marķēto audzes koku netika izvākti. Rezultāti uzrādīti 3.2.2. apakšnodaļā.

Papildus veikts harvestera darba novērtējums atkarībā no dažādiem stāvpunktu attālumiem trijās krājas kopšanas cismās:

2. pētījuma objektā, Engures iecirkņa 287. kvartālā;
9. pētījuma objektā, Vecumnieku iecirkņa 108. kvartālā;
10. pētījuma objektā, Misas iecirkņa 111. kvartālā.

Detalizētāks cirsmu raksturojums dots 2.1. tabulā.

Dīvās cirmās – 2. un 9. objektā - strādāja divi vienādas markas un modeļa – John Deere 1070d harvesteri, ar identiskām – H 745 modeļa darba galvām. Harvesteru maksimālais izlices garums – 10.0 m, kas nodrošināja koku aizsniedzamību 10 m attālumā no harvestera centra. Savukārt 10. pētījuma objektā strādāja Valmet 901.4 harvesters, kam koku aizsniedzamība arī bija 10.0 m. Pētījums veikts vairāku operatoru maiņu laikā, līdz ar to izslēdzot viena operatora darba izpildes savdabību ietekmi uz izmēģinājuma rezultātiem.

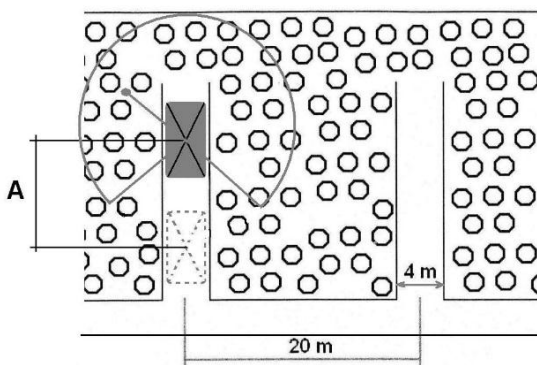
Tāpat kā iepriekšējā pētījumā, harvesters darbojās identiski sagatavotajās cirmu daļās ar marķētiem kokiem. Harvestera operatora uzdevums – konkrētajos tehnoloģiskajos koridoros ievērot vienu noteiktu pārbraucienu attālumu starp stāvpunktiem. Harvestera stāvpunktu maiņas iedalītas pēc pārbraucieniem triju veidu attālumā:

- mazs (1.5 – 2.0 m);
- vidējs (2.1 – 5.0 m);
- liels (5.1 – 8.0 m).

Labākai izpratnei 2.5. att. parādīts harvestera pārbraucienu attālums (A) starp stāvpunktiem uz tehnoloģiskā koridora.

Noteiktais pārbraucienu attālums konkrētajā tehnoloģiskajā koridorā tika ievērots, ko nodrošināja harvesterā iebūvētais odometrs, kura rādījums mašīnas operatoram nepārtraukti bija redzams uz datora monitora. Pielietotā metode ir pietiekami precīza un droša, tādēļ iespējamība, ka operators varētu pārkāpt noteiktā pārbrauciena attāluma robežas, ir nebūtiska.

Līdzīgi iepriekšējam izmēģinājumam, arī šoreiz pēc harvestera darba beigām tika apsekotas iezīmētās cirmu daļas un saskaitīti neizvāktie marķētie koki. Paralēli atzīmējot, pēc kāda pārbraucienu attāluma konkrētajā tehnoloģiskajā koridorā pārvietojies harvesters. Pēc tam dati ievadīti MS Excel elektroniskajās tabulās un aprēķināts, cik liels % marķēto audzes koku netika izvākti.



2.5. att. Harvestera darba zona un stāvpunktu attālums (A).

Fig. 2.5. Harvester work zone and pit stop distance (A).

Izkoptās audzes kvalitāte apzināta:

1. novērtējot izkoptās audzes biežumu;
2. izvērtējot atstājamo audzes koku kvalitāti.

Pirmajā izmēģinājumā noskaidrots izkoptās audzes biežums dažādā attālumā no tehnoloģiskajiem koridoriem. Savukārt audzes kvalitātes izpēte veikta īpaši sagatavotos taisnstūrveida parauglaukumos. Parauglaukumos pēc cirsma izstrādes saskaitīti visi koki, kas veido atstājamo audzi. Pēc tam koku skaits katrā parauglaukumā pārreķināts uz hektāra. Iegūtie parauglaukumu grupu dati apstrādāti, pielietojot dispersijas analīzi. Lai noteiktu datu vidējo rādītāju ticamības intervālus, veikts arī T-tests. Atstājamo audzes koku kvalitāte izvērtēta tām pašām 12 cirmām un tajos pašos parauglaukumos, kur izdarīts biežuma novērtējums. Vienlaicīgi ar koku uzskaitīšanu, veikta katra paliekošā audzes koka kvalitātes novērtēšana.

3. REZULTĀTI UN DISKUSIJA

3.1. Harvestera ražība dažāda sastāva mežaudzēs

Pētījumā noskaidrots, kā Latvijas apstākļos noris harvestera darbs krājas kopšanas cirtēs dažāda sastāva audzēs. Pētījumā izmantoti dati par harvestera darba ražīgumu, kas izteikts kā laika vienība - stundā ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$) - sagatavotais apaļkoksnes apjoms kubikmetros. Apkopojot izvēlēto 100 cirsmu datus, konstatēts, ka priežu tīraudzēs vidējā izvācamā koka stumbra tilpums ir 0.092 m^3 , jaukto sugu audzēs – 0.085 m^3 un egļu tīraudzēs – 0.068 m^3 .

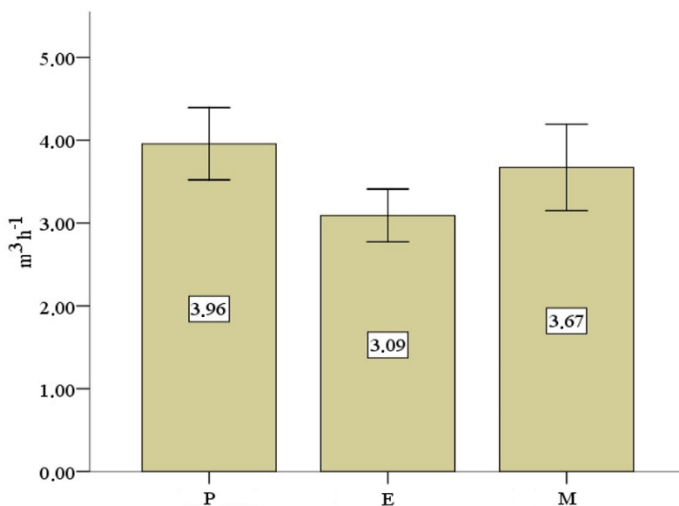
Atšķirībā no egļu un priežu audzēm, Latvijā ir salīdzinoši maz vidēja vecuma lapu koku tīraudžu. Pārsvārā sastopamas dažāda sastāva mistraudzes, kas parasti atrodas mitrās vietās, auglīgās augtenēs un kurām raksturīga liela sugu daudzveidība. Pētījumā noskaidrots, kā kopšana šādos apstākļos ietekmējusi harvestera darba ražīgumu; rezultāti uzrādīti 3.1. un 3.2. tabulā.

Veicot gradācijas klašu salīdzinājumu, konstatēts, ka harvestera darba ražīgums ir būtiski atšķirīgs priežu un egļu tīraudzēs. Tas redzams 3.1. attēla ticamības intervālos. Mistrotu, kā arī egļu un priežu audžu ticamības intervāli ir līdzīgi: tāpat, harvestera darba ražīgums mistraudzēs un skujkoku tīraudzēs būtiski neatšķiras. Tādēļ, kopjot šādas audzes, harvestera darba ražīguma rādītāju izkliedes diapazons ir visai plašs, un līdz ar to mežizstrādātājiem ražīgumu būs grūti prognozēt, ņemot vērā arī mistraudžu sastāva dažādību. Turpretī egļu tīraudzēs, kur standartnovirzes ir vismazākās, darba ražīguma prognozes problēmas neradīs.

3.1. Tabula / Table 3.1.

**Harvestera darba ražīguma ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$) salīdzinājums
dažāda sastāva audzēs (T-tests)**
*Harvester productivity ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$) comparison in the stands
of different composition (T-test)*

Audzes veids <i>Type of stand</i>	t	df	Vidējais <i>Average</i>	95% ticamības intervāls <i>95% credibility interval</i>	
				zemākais <i>lowest</i>	augstākais <i>highest</i>
P-tīraudze <i>(Pine)- pure stand</i>	18.451	33	3.95794	3.5215	4.3944
E-tīraudze <i>(Spruce)- pure stand</i>	19.736	33	3.09176	2.7730	3.4105
Mistraudze/ <i>Mixed stand</i>	14.324	33	3.67294	3.1513	4.1946



3.1. att. Harvestera darba ražīgums saistībā ar audzes sugu sastāvu.
Fig. 3.1. Harvester productivity related to the composition of species in the stand.

3.1. attēlā redzams, ka augstāko darba ražīgumu harvesters uzrāda, strādājot priežu tīraudzēs, otru augstāko – mistraudzēs, bet zemāko - egļu tīraudzēs.

3.2. Harvestera darba laika hronometrāža sagatavotās un nesagatavotās cirmās diennakts tumšajā laikā

Pielietojot krājas kopšanas cirtēs harvesterus, mežizstrādi var veikt 24 stundas diennaktī. Ņemot vērā augstās šādu mašīnu iegādes izmaksas, harvestera ilgstošas dīkstāves nav pieļaujamas. Mūsdienu tehniskie risinājumi nodrošina gandrīz visu mežizstrādes operāciju izpildi jebkurā diennakts laikā un atšķirīgos klimata apstākļos.

Iepazīstoties ar dažādu valstu mašinizētas audžu kopšanas pētījumiem, secināms, ka maz ir tādu, kas veikti saistībā ar harvestera darbu dažādos diennakts laikposmos. Tā kā mūsdienu ražošanā plaši izmanto maiņu darbu, būtiskākais faktors, kas varētu atšķirīgi ietekmēt harvestera ražību, ir darbs diennakts gaišajā un tumšajā laikā.

Kā jau minēts iepriekš, krājas kopšanas ciršu harvestera operatoram jābūt pietiekami zinošam mežkopības jautājumos. Izdarot vairākus izmēģinājumus naktī, konstatēts, ka operatoram šajā laikā problemātiska ir tieši izvācamo koku izvēle. Tādēļ tika veikta harvestera hronometrāža pilnam darba izpildes cikla laikam, operatoram apstrādājot pirmā stāva izvācamos kokus diennakts tumšajā laikā. Atsevišķās cirsma daļās izvācami koki bija marķēti ar luminiscējošu krāsu, bet atlikušajās – izvācamos kokus harvestera operators izvēlējās pēc saviem ieskatiem.

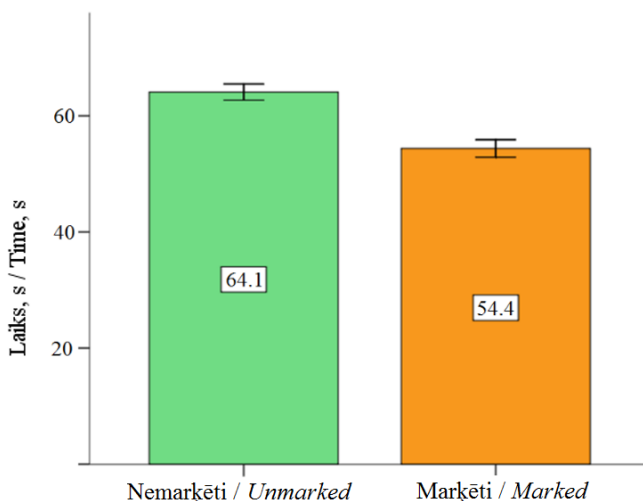
Harvestera hronometrāžas datu apstrādei izmantots T-tests.

3.2. tabula / Table 3.2

Marķēto un nemarkēto izvācamo koku apstrādei patērētā darba laika (s) salīdzinājums (T-tests)

*Comparison of the work time (s) spent on the processing of the marked and unmarked trees to be removed
(T-test)*

Izvācami koki <i>Trees to be removed</i>	t	Standart-novirze <i>Standard deviation</i>	Standart kļūda <i>Standard error</i>	Vidējais <i>Average</i>	95% ticamības intervāls <i>95% credibility interval</i>	
					zemākais <i>lowest</i>	augstākais <i>highest</i>
Marķēti <i>Marked</i>	73.06	4.823	0.744	54.381	52.878	55.884
Nemarkēti <i>Unmarked</i>	92.79	4.477	0.691	64.095	62.700	65.490



3.2. att. Marķēto un nemarķēto izvācamo koku apstrādei patērētais vidējais darba laiks.

Fig. 3.2. The average work time spent on the processing of the marked and unmarked trees to be removed.

Attēlā 3.2. redzams, ka marķēto un nemarķēto izvācamo koku vidējais apstrādei patērētais darba laiks atšķiras būtiski, jo aprēķinātie ticamības intervāli savstarpēji nepārsedzas. No 3.2. attēla secināms, ka izvācamo marķēto koku apstrādei patērētais vidējais darba laiks ir par 15 % mazāks, nekā izstrādājot nemarķētos kokus. Tas liecina, ka, harvesteram strādājot diennakts tumšajā laikā, darba ražīgums sagatavotajās cirsmu daļās būs krietni augstāks, nekā nesagatavotajās cirsmu daļās. Ņemot vērā tik būtiskas koku apstrādes cikla laika atšķirības, mežizstrādes firmām vajadzētu pielietot izvācamo koku marķēšanu tajās audžu platībās, kur paredzēta mašinizēta kopšana naktī. Šajā pētījumā izvācamo koku marķēšana aizņēma ≈ 1 cilvēkstundu uz hektāra, pie nosacījuma, ka marķēšana izdarīta visā cirsmas platībā.

3.3. Pārredzamības novērtējums no dažādu marku harvesteru kabīnēm

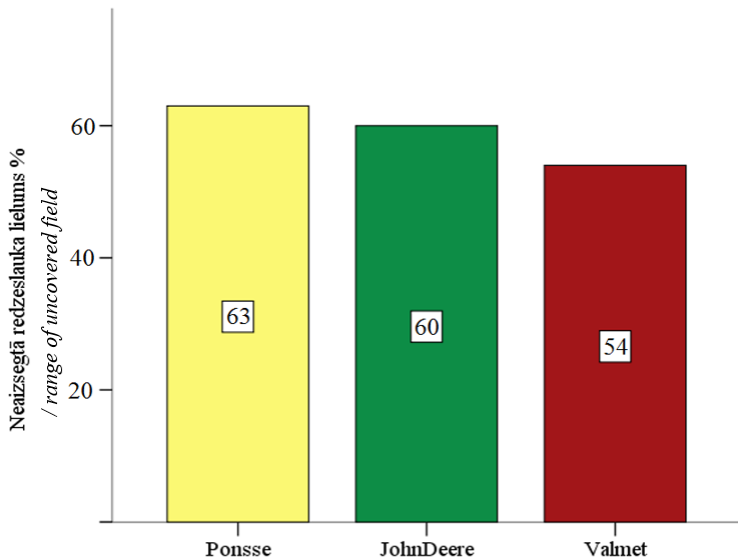
Pārredzamība novērtēta no harvestera operatora darba vietas – kabīnes. Izmēģinājumi veikti pēc iepriekš aprakstītās „ēnu” metodes, ar trīs dažādu marku un konstrukciju kopšanas ciršu harvesteriem (Valmet 901.4, Ponsse Beaver un John Deere 1070d), kuriem kabīņu un hidromanipulatoru izvietoējums ir atšķirīgs.

Iegūtie dati katram harvestera tipam apkopoti 3.3. tabulā un grafiski parādīti 3.3. attēla diagrammā.

3.3. tabula / Table 3.3

Pārredzamības salīdzinājums no dažādu harvesteru kabīnēm*Comparison of visibility range from different harvester cabins*

Harvestera marka, modelis <i>Harvester make, model</i>	Mērvienībās <i>Measuring unit</i>	Redzamā laukuma daļa % <i>Visible part of field %</i>	Apēnotā laukuma daļa % <i>Sections covered by shadow%</i>	Kopā <i>Total</i>
Ponsse Beaver	m	44.1	25.9	70
	%	63	37	100
John Deere 1070d	m	42.0	28.0	70
	%	60	40	100
Valmet 901.4	m	37.8	32.2	70
	%	54	46	100

**3.3. att. Pārredzamības salīdzinājums no dažādu harvesteru kabīnēm.***Fig. 3.3. Comparison of visibility range from cabins of different harvesters.*

Ar 3.3. tabulā iekļautajām mērvienībām (m) izteikts pētījumā nospraustā taisnstūra perimetra daļas garums (skat. 2.4. att.), kas sadalās apēnotajā daļā un ēnas nenosēgtajā daļā jeb redzamajā laukuma daļā. Kopējais taisnstūra perimetrs ir 70 m.

No 3.3. attēla secināms, ka neaizsegtā redzeslauka diapazons, skatoties no harvesteru operatora kabīnes, dažādu marku mašīnām ir atšķirīgs. Labāks tas ir Ponsse Beaver kopšanas ciršu harvesteriem, kuriem neaizsegtā laukuma daļa ir vislielākā – 63%. Otrs labākais rādītājs ir John Deere 1070 harvesteriem – 60%, bet sliktākais - Valmet 901.4 harvesteriem, kas skaidrojams ar savdabīgo hidromanipulatora izvietojumu attiecībā pret kabīni. Pārredzamība ir viens no svarīgākajiem rādītājiem, kas noteikti izvērtējams, iegādājoties harvesteru: to par būtisku uzskata arī vairāki Skandināvijas valstu harvesteru ergonomikas pētnieki (Brunberg, 1997; Lageson, 1997).

3.4. Harvesteru darba novērtējums sagatavotajās cirsmās

Pētījumā izvērtējamo koku aizsniedzamības novērojumi veikti speciāli sagatavotās cirsmās. Arī šoreiz izvērtējamie koki marķēti ar luminiscējošu krāsu, lai neviens no tiem nepaliktu harvesteru operatora nepamanīts. Koki marķēti, strikti ievērojot mežkopības prasības. Pirms harvesteru darba uzsākšanas izstrādei sagatavotajās cirsmās katra operatora uzdevums - strādāt pēc ierastās tehnoloģijas un tempa, izvērtējot tikai marķētos kokus, kas pirms tam jau katrā cismā bija uzskaitīti.

Pēc cirsmu izstrādes tika noskaidrots marķēto, neizvērtēto koku skaits un procentuāli aprēķināts, kāds daudzums izvērtēto koku palicis izkoptajā audzē. Rezultāti skatāmi 3.4. tabulā.

3.4. tabula / Table 3.4.

Izvērtēto koku sadalījums pirms un pēc mašīnizētās kopšanas *Distribution of the the trees to be removed before and after machine operated thinning*

CirsmasNr. <i>No of felling site</i>	Marķēto koku skaits pirms izstrādes <i>Number of marked trees before cutting</i>	Marķēto, neizvērtēto koku skaits pēc izstrādes <i>Number of marked trees after cutting</i>	% no marķēto koku skaita <i>% of marked trees</i>
1	408	15	3.7
2	245	18	7.3
3	252	13	5.2
4	165	9	5.5
5	234	10	4.3
6	241	8	3.3
7	361	18	5.0
8	192	11	5.7
9	315	12	3.8
10	360	24	6.7
11	288	12	4.2
12	336	16	4.8
Kopā <i>Total</i>	3397	166	4.9

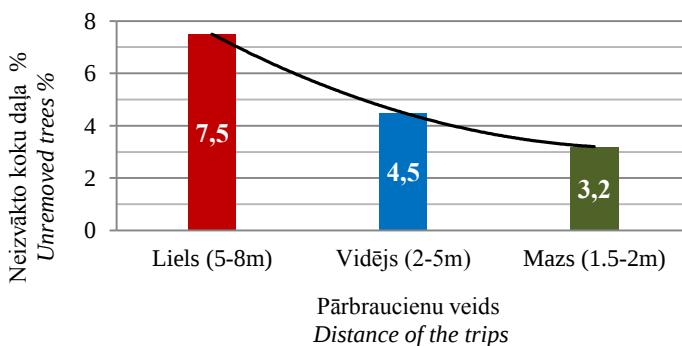
No 3.4. tabulas secināms, ka vidēji 4.9 % no izvācamajiem kokiem palikuši audzē tieši to neaizsniedzamības dēļ. Lai nepazeminātos kopšanas intensitāte, harvesteru operatori dažkārt izvāc tikai vieglāk aizsniedzamos kokus, tīši ignorējot mežkopības prasības. Godprātīgākās mežizstrādes firmas pēc audzes izkopšanas dažkārt norīko mežkopjus, lai tie ar rokas motorzāģiem izstrādā harvesteru neaizsniegtos kokus.

3.5. Harvesteru darba novērtējums pie dažādiem stāvpunktu attālumiem

Harvesteru stāvpunkti un stāvvietu maiņa uz tehnoloģiskā koridora pārsvarā apzināta ergonomikas un tehnoloģijas pētījumos. Savukārt šī darba ietvaros izvērtēts harvesteru darbs kopšanas cirtē pie dažādiem stāvpunktu attālumiem, respektīvi, kāda ir harvesteru iespēja no konkrētā stāvpunkta aizsniegt izvācamo (marķēto) koku. Harvesteru stāvvietu maiņas iedalītas pēc pārbraucienu attāluma:

- mazs (1.5 – 2.0 m);
- vidējs (2.1 – 5.0 m);
- liels (5.1 – 8.0 m).

Līdzīgi iepriekšējiem arī šie izmēģinājumi izdarīti speciāli sagatavotās cirsma daļās, kur pirms kopšanas izvācamie koki marķēti. Pēc harvesteru darba katrā tehnoloģiskajā koridorā saskaitīti marķētie, bet neizvērtētie koki, atzīmējot arī kādu pārbraucienu attālumu konkrētajā koridorā veicis harvesteru. Dati apkopoti un apstrādāti ar MS Excel; ievērojot konkrētā pārbrauciena attālumu, aprēķināts, kāds daudzums marķēto koku palicis neizvērtēts. Rezultāti uzrādīti 3.4. attēlā.



3.4. att. Marķēto neizvērtēto koku daudzums pēc mašīnizētās kopšanas.

Fig. 3.4. The number of marked unremoved trees after machine operated thinning.

No 3.4. attēla secināms - jo pārbraucienu attālums starp stāvpunktiem harvesteram bijis lielāks, jo vairāk palicis neizvērtēto koku. Palielinot pārbraucienu attālumu, pasliktinās izvācamo koku aizsniedzamība un izkopšanas audzes kvalitāte.

Praksē harvesteru operators pārbrauciena attālumu piemēro konkrētās vietas situācijai audzē. Ja tajā vietā audze ir biežāka un izvācamu vairāki koki, tad pārbrauciena attālums pa tehnoloģisko koridoru būs mazāks, turpretī, ja audze konkrētajā vietā ir retāka, pārbrauciena attālums būs lielāks. Veicot pārbraucienu mazākos attālos, konkrētās vietas izkopšana harvesteram aizņem ilgāku laiku, kas

var samazināt darba ražīgumu, kā arī var būt viens no iemesliem, kādēļ operatori dažkārt izvēlas pārāk lielus pārbraucienu attālumus.

3.6. Izskoptās audzes biežuma izvērtējums

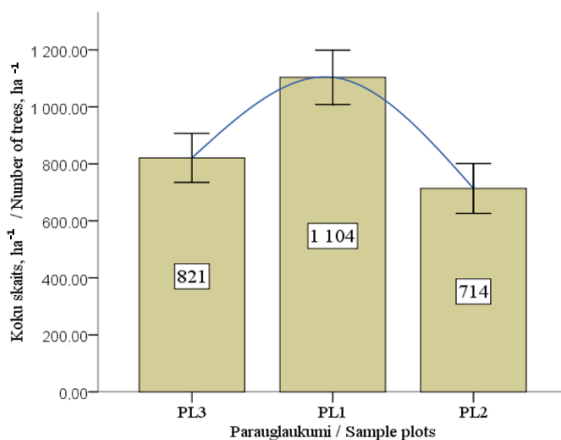
Pētījumā novērtēts izskoptās audzes biežums dažādos attālumos no tehnoloģiskajiem koridoriem. Audzes sleja starp koridoriem tika sadalīta trīs vienādās daļās, katrā ierīkojot vienu taisnstūrveida parauglaukumu, kura platība 100 m² (2.3. att). Parauglaukumos ir noteikts atstāto koku skaits, kas pārrēķināts uz hektāra. Parauglaukumi izraudzīti tā, lai parauglaukumu grupu PL3 varētu izskopt virzienā uz neizstrādātās audzes pusi, bet otru, malējo parauglaukumu grupu PL2 - blakus izstrādātajai audzes daļai.

Ievāktā informācija pa parauglaukumu grupām apstrādāta, izmantojot dispersijas analīzi. Lai iegūtu datu vidējo rādītāju ticamības intervālus, veikts arī T-tests. Rezultāti parādīti 3.5. tabulā, kā arī grafiskā veidā 3.5. attēlā.

3.5. tabula / Table 3.5.

Izskoptajā audzē atstāto koku skaita salīdzinājums (T-tests)
Comparison of the number of trees left in the thinned stand (T-test)

Pauglaukumu grupas <i>Sample plot groups</i>	t	Standart-novirze <i>Standard deviation</i>	Standart-klūda <i>Standard error</i>	Vidējais <i>Average</i>	95% ticamības intervāls <i>95% credibility interval</i>	
					zemākais <i>lowest</i>	augstākais <i>highest</i>
PL3	20.994	135.443	39.099	821	734.777	906.889
PL1	25.550	149.658	43.203	1104	1008.745	1198.922
PL2	17.938	137.850	39.794	714	626.248	801.419



3.5. att. Izskoptās audzes nevienmērīgums attiecībā pret tehnoloģiskajiem koridoriem.

Fig. 3.5. Non-uniformity of the thinned stand in relation to strip roads.

No 3.5. attēla secināms, ka dažādi izvācamo koku aizsniedzamības apstākļi ir par iemeslu tam, ka mežaudzes slejas vidusdaļā - starp tehnoloģiskajiem koridoriem - turpmākai augšanai atstāti būtiski vairāk koku nekā slejas malās blakus tehnoloģiskajam koridoram. Tādējādi mežaudze ir izkopta nevienmērīgi, galvenokārt koku neaizsniedzamības, mašinizētās kopšanas tehnoloģijas nepilnību un, dažkārt, operatora paviršības dēļ.

Harvestera operators, strādājot uz tehnoloģiskā koridora, abu piegulošo pussleju daļas novērtē atšķirīgi: pussleja, kas atrodas blakus izstrādātajai audzes daļai tiek izkopta intensīvāk nekā pussleja virzienā uz neizstrādātās audzes pusi, taču šīs atšķirības nav būtiskas.

4. PROJEKTI UN JAUNIEVEDUMI

4.1. Izvācamo koku uzskaites ierīce harvesteram

Krājas kopšanas cirtēs viens no galvenajiem un kontrolējamiem mežsaimniecisko prasību nosacījumiem ir pietiekams paliekošās audzes šķērslaukums. Būtisks ir arī paliekošās audzes koku vienmērīgs izvietojums, t.i., lai uz katras izkoptās platības vienības atrastos vienāds vai līdzīgs koku skaits. Tā kā iepriekš minētā problēma ir nozīmīga, veicot mašinizētu krājas kopšanas ciršu izstrādi, šajā darbā meklēts iespējamais risinājums – izveidot harvesteram izvācamo koku uzskaites ierīci.

Vispirms izdarāma harvestera darba zonu matemātiskā analīze. Lai mežizstrādes mašīna – harvesters – būtu izmantojams krājas kopšanas cirtēs, svarīga ir tā tehnisko parametru atbilstība darba vides apstākļiem. Vērtējot harvesteru piemērotību krājas kopšanai speciālisti atzīst, ka galvenā problēma ir izvācamo koku aizsniedzamība, t.i., izstrādei paredzēto koku mehāniska satveršana un turpmāk veicamo manipulāciju izpilde, lai vēlāk apstrādātos un pēc sortimentiem sakārtotos kokmateriālus (koku stumbra daļas) pārvietotu no mežaudzes uz krautuvi. Svarīgākais šajā procesā ir audzē izvācamo koku izvēle un to satveršana ar mežizstrādes mašīnas darba galvu.

Operāciju sistēmas vadīšanai lieto īpašas programmu paketes: John Deere mašīnās - „Timbermatic™ 300”. Harvesteram strādājot, „Timbermatic™ 300” sistēma kontrolē harvestera galvas pacelšanas rāmi, padeves veltņus, atzarošanas nažus un zāģēšanu, bet stumbru padeves laikā nepārtraukti seko stumbra garuma un caurmēra skaitliskajiem lielumiem, kā arī zāģa sliedes stāvoklim zāģēšanas laikā.

Kopsavilkuma 3.6. nodaļā ietverti veikto izmēģinājumu rezultāti: mežaudzes slejas vidusdaļā - starp tehnoloģiskajiem koridoriem - atstāts ievērojami vairāk koku nekā slejas malās, blakus tehnoloģiskajam koridoram. Praksē mežsaimniecisko prasību ievērošanas kontrole bieži notiek pēc izstrādes pabeigšanas, un tā rezultātā iegūtā informācija ir tikai faktus konstatējoša. Lai novērstu atklātās nepilnības, būtu jāatgriežas darbu izpildes sākumposmā, kas būtiski sadārdzinātu un paildzinātu tehnoloģisko mežizstrādes procesu.

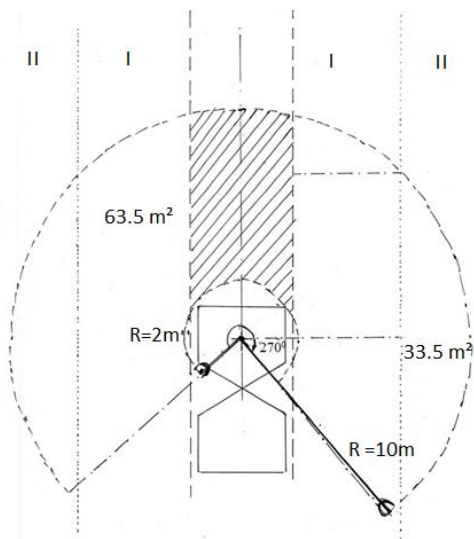
Iepriekš, 3.6. nodaļā, minētie rezultāti liecina, ka harvesteru vadības sistēmā nepieciešams ieslēgt kontroles mehānismu, kas uzskaitītu izvācamo koku atrašanās vietas attiecībā pret tehnoloģisko koridoru.

Darbā iegūtais, pēc krājas kopšanas paliekošās mežaudzes koku izvietojuma teorētiskais kontroles algoritms balstīts uz šādiem pieņēmumiem:

1. sākotnēji visu koku izvietojums cīsmā ir vienmērīgs;

2. izvākšanai paredzētie koki cīsmā izvietojas starp augšanai atstājamiem kokiem;
3. harvestera operators katrā tehnoloģiskā koridora stāvvietā izkopj abas piegulošās joslas un vidusjoslas abas puses (sk. 4.1. att.);
4. vienā darba stāvvietā izvākto koku skaits ir proporcionāls tai platībai, kuru var apstrādāt harvestera hidromanipulators.

Ņemot vērā minētos pieņēmumus, izvērtētas harvestera hidromanipulātorā iespējas darba zonas horizontālajā plaknē (sk. 4.1. att.).



4.1. att. Harvestera hidromanipulātorā darba zona horizontālajā plaknē.

Fig. 4.1. The work zone of harvester boom in horizontal plane.

Pēc tehniskajiem rādītājiem harvestera hidromanipulātorā darba zonas forma veido 270° no pilna apļa ar maksimālo rādiusu 10.0 m un minimālo rādiusu 2.0 m, un tā ir simetriska tehnoloģiskā koridora garenasij. Izmantojot apļa laukuma formulu, darba zonas (S) kopplatība ir:

$$S = (\pi \times R^2 \times 0.75) - (\pi \times r^2 \times 0.75),$$

kur

$\pi = 3.14$;

R - maksimālā hidromanipulātorā izlice;

r - minimālā hidromanipulātorā izlice;

0.75 – koeficients, kas raksturo darba zonas leņķa rādītāju.

Aprēķini liecina, ka kopplatība S ir vienāda ar 226 m², bet tā kā darba zonas daļā, kur atradīsies tehnoloģiskais koridors, paredzēta visu koku izcīršana, tā izslēdzama no kopplatības S. Tātad darba zonā, kur jānodrošina vienmērīgs paliekošo koku izvietojums, S_d nosakāms pēc formulas:

$$S_d = S - S_{tk}, \quad (4.2.)$$

kur

$$S_{tk} = 4 \times (R-r), \quad (4.3.)$$

rezultātā $S_{tk} = 32 \text{ m}^2$ un $S_d = 194 \text{ m}^2$.

Ņemot vērā, ka harvestera darbs krājas kopšanas cirtēs notiek abās tehnoloģiskā koridora pusēs, tad $S_d / 2 = 97 \text{ m}^2$. T. Roziņa 1976. gadā konstatējusi, ka manipulatora tipa mežizstrādes mašīnām optimāli piemērotākais pārbrauciens ir tāds, kas atbilst bāzes mašīnas garumam (3-5 m), un kuru pielietojot, iespējams aizsniegt 92% no izvācamajiem kokiem (Розинь, 1978). Šāds rādītājs bija pieņemams 20. gadsimta 80.-jos gados, bet mūsdienās vairs neatbilst krājas kopšanas ciršu mežsaimnieciskajām prasībām.

4.1. attēlā redzams, ka koku izciršana notiek gan 1. joslā, gan pusē no mežaudzes vidusjoslas. Pielietojot ģeometrisku figūru platību aprēķina formulas, 1. joslas darba zonas platība nosakāma kā komplicēta platību summa S_1 , bet darba zonas platība vidusjoslā - kā starpība starp:

$$S_2 = (S_d/2) - S_1 \quad (4.4.)$$

Aprēķini rāda, ka: $S_1 = 63.5 \text{ m}^2$ un $S_2 = 33.5 \text{ m}^2$.

Ņemot vērā iepriekš minētos pieņēmumus par izvācamo koku vienmērīgu izvietojumu cirsma, darba zonu attiecība pa joslām attieksies arī uz izvācamo koku skaita proporciju:

$$\frac{S_2}{S_1} = 33.5 \div 63.5 = 0.53 \text{ vai otrādi } (1.89)$$

Katrā harvestera darba stāvvietā - tehnoloģiskajam koridoram piegulošajā joslā izvāktu un apstrādātu koku skaitam (2.0 m - 7.0 m no hidromanipulatora izlīces) jābūt 1.89 reizes lielākam, nekā tālākās darba zonas vidusdaļas pusjoslā. Kontrolējot iepriekš minēto attiecību, panākams vienāds paliekošo koku skaits uz platības vienības (piem. 100 m^2) izstrādātajās joslās, kā arī atstājamo koku skaits visās joslās starp tehnoloģiskajiem koridoriem būs tuvs vienādam. Šādi izkoptā mežaudzē koku izvietojums būs vienmērīgs. Balstoties uz šiem teorētiskajiem aprēķiniem, ir īstenojama harvestera darbības kontroles sistēma, kura ļaus harvestera operatoram panākt vienmērīgāku atstājamo koku izvietojumu izkoptajā audzē.

Leņķu kontroles sensors ir piestiprināts pie hidromanipulatora nekustīgās daļas un signālus saņem uztvērējs pie hidromanipulatora kustīgās kolonnas. Izlīces attāluma kontroles sensors atrodas hidromanipulatora liekuma vietā - teleskopiskā posma tālākajā punktā. Pārtraugot hidromanipulatora pagriezienu leņķi un izlīces rādītāju, nosakāma darba zona, kurā atrodas ciršanai paredzētais koks. Piemēram, ja harvestera darba galva atrodas leņķa (τ) diapazonā un izlīce ir 2.82 m – 7.0 m, tad cērtamais koks atrodas piegulošajā joslā. Tiklīdz hidromanipulators sasniedz leņķi (α), pie izlīcēm 7.0 m - 10.0 m ($\omega_1 - \omega$), koku izņemšana izdarāma vidusjoslā. Tas pats ir arī tad, kad hidromanipulators atrodas leņķa sektorā, kā spoguļattēla tehnoloģiskā koridora pretējā pusē. Iegūtā informācija ievadāma harvestera bortdatorā vai arī vadības sistēmai pievienojama skaitļojamā ierīce.

4.2. Mežizstrādes mašīnas izvācamo koku aizsniedzamības modelis

Sistēmas „harvesters – darba vide” realizēšanai nepieciešams izveidot mežizstrādes darbiem piemērotu mežaudzes modeli. Mūsdienās izstrādāti vairāki atšķirīgi modeļi:

1. mežaudžu modeļi bez atsevišķu koku teritoriālā izvietojuma;
2. mežaudzes modeļi ar atsevišķu koku izvietojuma koordinātām.

Izvācamo koku aizsniedzamības novērtējumam piemēroti tikai mežaudzes modeļi ar koku izvietojuma koordinātām, jo harvesteru darbs notiek horizontālajā plaknē. Aizsniedzamības aspektā taksācijas rādītāji nav būtiski, toties nepieciešamas ir izvācamo koku matemātiskā centra (punkta) koordinātas (x_i ; y_i).

Nepieciešamības gadījumā mežaudzes modelis papildināms ar vajadzīgajiem parametriem, piemēram, koku caurmēru, koku augstumu u.c., kas precizēs modeļa pielietojamību.

Latvijas mežaudzēm raksturīgi šādi koku izvietojuma veidi:

1. vienmērīgs izvietojums;
2. vienmērīgs izvietojums pēc ģeometriskā principa (rindu stādījumi);
3. koku izvietojums grupās (pārsvārā melnalkšņu audzēs).

Tā kā šajā darbā izziņāti tikai koku aizsniedzamības modeļa darbības principi, detalizētāk aplūkosim pirmo variantu. Pēc varbūtības likuma pie vienmērīga koku izvietojuma koku matemātisko centru koordinātas izsaka formula:

$$X = \gamma \cdot A$$

$$Y = \gamma \cdot B$$

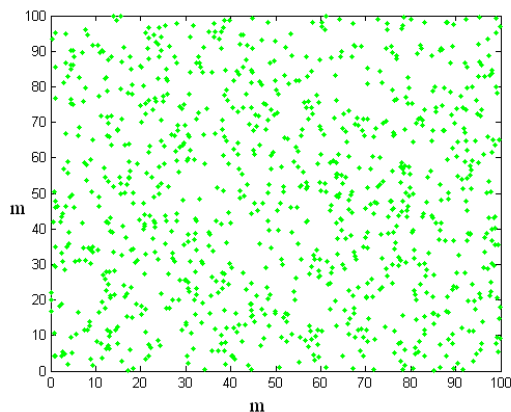
kur

γ – nejauši ģenerētais skaitlis intervālā $[0,1]$;

A, B – mežaudzes taisnstūra gabarīti (m).

Šajā gadījumā mežaudzes modelēšana ir vienkāršota, bet pilnīgi pietiekama, lai, pielietojot mežizstrādes mašīnu – harvesteru, noteiktu izvācamo koku aizsniedzamību.

Koku aizsniedzamības modeļa būtības labākai izpratnei palīdzēs šāds piemērs: Cirsma ir kvadrātveida - $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} = 1 \text{ ha}$, 1000 koki uz ha. Pieņemsim, ka audzi veido vienas sugas un vienāda izmēra koki (skat. 4.2. att.). Attālums starp tehnoloģiskajiem koridoriem - 20 m, tehnoloģiskā koridora platums - 4 m. Harvesteru operatora uzdevums – izstrādāt šo platību, izvēcot 40 % audzes koku un vienmēr veicot tikai lielo pārbrauciena attālumu - 8 m starp stāvvietām.



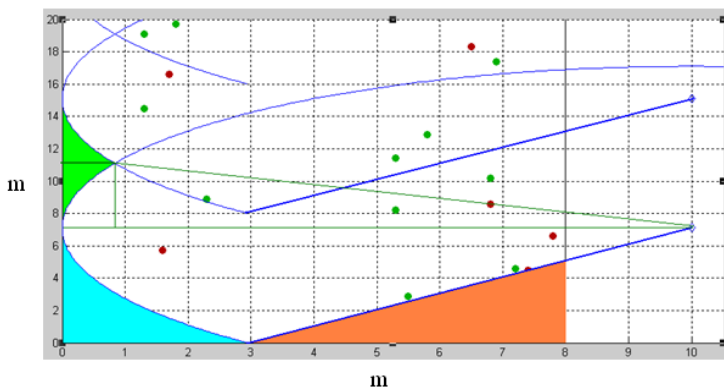
4.2. att. Mežaudzes modelis ar 1000 kokiem.

Fig. 4.2. Forest stand model with 1000 trees.

Tā kā visi tehnoloģiskie koridori ir vienādi un atšķiras tikai to izvietojums, apskatīsim tikai vienu no tiem, un novērtēsim situāciju atbilstoši modelējamai audzei.

Viena tehnoloģiskā koridora laukums: $S = 4\text{ m} \cdot 100\text{ m} = 400\text{ m}^2$, kas aizņem $\frac{400}{100 \cdot 100} = 0.04$, jeb 4% no audzes kopplatības. Līdz ar to tehnoloģiskajā koridorā attiecīgi jāatrodas 4% no visiem kokiem, tātad 4% no $1000 = 40$. Modeļējot šī piemēra mežaudzi, pirmajā tehnoloģiskajā koridorā ir 36 koki, kas aptuveni atbilst 4%. Apskatot atlikušos četrus tehnoloģiskos koridorus, situācija ir mazliet atšķirīga: vienā koridorā ir nedaudz mazāk nekā 4%, bet citā nedaudz vairāk koku.

Tā kā izvācamie sastāda 40% no visiem (1000) audzes kokiem, tad 40% no 1000 ir 400 izvākšanai paredzēto koku. No tiem puse, t.i. 200, atrodas uz tehnoloģiskajiem koridoriem, tātad aizsniedzamības problēmas harvesteram varētu būt ar atlikušajiem 200 izvācamajiem kokiem.



4.3. att. Harvestera darba zonas nenosegtā platība pie pārbrauciena attāluma 8 m.

Fig. 4.3. The uncovered work zone area of the harvester at travel distance of 8m.

Pievērsīsimies pirmā tehnoloģiskā koridora kreisās mežaudzes pusslejas harvestera nenosegtajai darba zonai (skat. 4.3. att.) Apskatot oranži iekrāsoto platības segmentu, konstatējam, ka tas ir taisnleņķa trijstūris, kura hipotenūza ir 10 m un katetes atbilstoši $5\sqrt{2} \approx 7.07$ m. Tad trijstūra laukums ir $\frac{(5\sqrt{2})^2}{2} = 25\text{ m}^2$. No audzes kopplatības tas aizņem $\frac{25}{100 \cdot 100} = 0.0025 = 0.25\%$. Atbilstošais koku skaits šajā laukumā varētu būt 2.5; konkrētajā piemērā tas ir viens koks (turklāt izvācamais), kas aug ļoti tuvu darbības zonai.

Pievērsīsimies zili iekrāsotajam platības segmentam (4.3. att). Ja apskatām taisnstūri, kura koordinātu sākumpunkts sakrīt ar tā virsotni, bet mašīnas centrs - ar taisnstūra pretējo virsotni, atbilstošā segmenta laukums aprēķināms, ja no taisnstūra laukuma atņem sektora laukumu un atbilstošā taisnleņķa vienādsānu trijstūra laukumu.

$$S_{\text{taisn}} = ab = 10 \cdot 7.1 = 71 \quad (4.6.)$$

$$S_{trijs} = \frac{a^2}{2} = \frac{7.1^2}{2} \approx 25.21$$

$$S_{sekt} = \frac{\pi R^2 \cdot \varphi}{360^\circ} = \frac{\pi \cdot 10^2 \cdot 45^\circ}{360^\circ} \approx 39.27$$

$$S = 71 - 25.21 - 39.27 = 10.52$$

Šis laukums veido daļu no visa laukuma: $\frac{10.52}{100 \cdot 100} \approx 0.0011 = 0.11\%$ vai 1.1 koks. Piemēra gadījumā atstājamais ir viens koks.

Zaļi iekrāsoto platības segmentu varam sadalīt divās daļās. Aprēķinu izdarīsim tikai pusei laukuma, iegūto rezultātu palielinot 2 reizes, tad vēl 11 reizi, jo tādu apgabalu pavisam ir 11.

Noteiksim divu riņķu līniju krustpunktu, izmantojot riņķa līniju vienādojumus:

$$(x - 10)^2 + (y - 7.1)^2 - 10^2 = (x - 10)^2 + (y - 15.1)^2 - 10^2$$

Rezultātā iegūstam $y = 11.1$. tad $x = 0.83$.

$$S_{segm} = \frac{1}{2} R^2 \left(\frac{\pi \varphi}{180^\circ} - \sin \varphi \right) \quad (4.7.)$$

$$S_{segm} = \frac{1}{2} \cdot 10^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 23.58^\circ}{180^\circ} - \frac{4}{10} \right) \approx 0.58$$

$$S = 4 \cdot \left(10 - \sqrt{10^2 - 4^2} \right) - 0.58 \approx 2.74$$

Apsekojot visas harvestera darba zonas, kur mašīnas pārbrauciena attālumš bijis 8 m, konstatējam, ka pētāmajā cīsmā (piemērs) harvestera darba zonu ietvaros nebūs aizsniedzami 4 izvācamie koki un 1 koks ārpus zonas, tātad pavisam 5 koki. Aprēķinot procentuāli, $\frac{5}{200} \approx 0.025 = 2.5\%$. Tātad pie šādas, teorētiski pieņemtas, situācijas harvesteram aizsniedzami būs 2.5% no izvākšanai paredzētajiem kokiem.

Līdzīgi aprēķināms, kāds daudzums izvācamo koku nebūtu aizsniedzami pie dažāda audzes biezuma, koku izvietoējuma un atšķirīgiem harvestera pārbrauciena attālumiem.

Nopamatojot mežizstrādes mašīnas koku aizsniedzamības modeļa principus, iespējams izveidot datorprogrammu, ar kuru būtu aprēķināmi harvestera operatoram optimālākie pārbraucieni attālumi konkrētās audzes apstākļos. Lai šādas datorprogrammas pielietošanas rezultāti būtu pārliecinoši, sākotnēji ievācama detalizētāka informācija par audzi un tās taksācijas rādītājiem:

- koku izvietoējumu;
- sugu sastāvu;
- mežaudzes stāviem;
- sākotnējo audzes biezumu;
- vidējo atstājamo un izvācamo koku caurmēru u.c.

Apzinoties Latvijas mežaudžu daudzveidību, jāatzīst, ka veiktos aprēķinus varētu sekmīgi pielietot viendabīgu tīraudžu, kā arī audžu ar rindu stādījumiem izstrādē. Izmantojot izstrādāto izvācamo koku aizsniedzamības modeli, būtu aprēķināms optimālais harvestera pārbraucieni attālums (solis) un no katras pusslejas izvācamo koku skaits.

SECINĀJUMI UN PRIEKŠLIKUMI

1. Krājas kopšanas cirtēs augstāko darba ražīgumu harvesters uzrāda priežu tīraudzēs – $3.96 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$, pie vidējā izvācamā koka stumbra tilpuma 0.092 m^3 . Otrs augstākais darba ražīguma rādītājs jauktu sugu audzēs – $3.67 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$, pie vidējā izvācamā koka stumbra tilpuma 0.085 m^3 , savukārt zemākais - egļu tīraudzēs – $3.09 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$, pie vidējā izvācamā koka stumbra tilpuma 0.068 m^3 . Veicot gradāciju klašu salīdzinājumu, konstatēts, ka būtiski atšķirīgs harvestera darba ražīgums ir priežu un egļu tīraudzēs.
Aprēķinātās harvestera darba ražīguma standartnovirzes vislielākās ir mistraudzēs, bet vismazākās - egļu tīraudzēs. Tas nozīmē, ka kopjot dažādas mistraudzes, darba ražīguma rādītāji ir izkliedēti samērā plašā diapazonā, kas mežizstrādātājam apgrūtinās prognozēt harvestera darba ražīgumu katrā no mistraudzes cismām.
2. Krājas kopšanas cirtēs harvestera vidējais darba operāciju izpildei patērētais laiks viena koka apstrādei katrā no audzes stāviem ir būtiski atšķirīgs: pirmā stāva koku apstrādei harvesteram nepieciešams divreiz ilgāks laiks, nekā otrā stāva koku apstrādei. Salīdzinot standartnovirzes un minimālās un maksimālās darba laika patēriņa vienības, konstatēts, ka pirmā stāva koku apstrādes hronometrāžas laiki izkliedēti daudz plašākā diapazonā, nekā otrā stāva hronometrāžas laiki, kas skaidrojams ar pirmā stāva izvācamo koku stumbru un vainagu īpatnībām (dubultstumbri, dubultgalotnes, padēli, atsevišķi resni zari u.c.).
3. Harvesteram sagatavotajās cismu daļās strādājot diennakts tumšajā laikā, izvācamo marķēto koku vidējais apstrādes laiks ir par 15 % mazāks, nekā izstrādājot nemarkētos kokus. Marķēto un nemarkēto izvācamo koku vidējie apstrādes laiki atšķiras būtiski.
4. Dažādu marku harvesteriem, skatoties no operatora kabīnes, neaizsegtā redzeslauka diapazons nav izstrādājamo platību vienādi aptverošs: lielākā neaizsegtā lauka daļa ir Ponsse Beaver kopšanas cirmu harvesteriem, nākamie, kā šajā ziņā labākie, atzīstami John Deere 1070 harvesteri, bet sliktākie redzeslauka rādītāji ir Valmet 901.4 harvesteriem, kas skaidrojams ar savdabīgo hidromanipulatora izvietojumu attiecībā pret kabīni.
5. Veicot krājas kopšanas cirtes mašinizēti, vidēji 4.9 % no izvācamajiem kokiem tieši neaizsniedzamības dēļ paliek audzē.
6. Harvesteram darba procesā pārvietojoties starp stāvpunktiem ar lielākiem pārbrauciena attālumiem, pasliktinās izvācamo koku aizsniedzamība, kā rezultātā pazeminās izkoptās audzes kvalitāte.
7. Atšķirīgie izvācamo koku aizsniedzamības apstākļi ir par iemeslu tam, ka mežaudzes slejas vidusdaļā - starp tehnoloģiskajiem koridoriem - turpmākai augšanai tiek atstāts būtiski lielāks skaits koku (no 15% līdz 35%), nekā slejas malās, blakus tehnoloģiskajam koridoram. Tādējādi mežaudzes tiek izkoptas nevienmērīgi.
8. Harvestera operators, strādājot mežaudzes tehnoloģiskajā koridorā, abas piegulošās pusslejas saredz atšķirīgi: pussleja, kas atrodas blakus izstrādātajai audzes daļai tiek izkopta intensīvāk nekā pussleja virzienā uz neizstrādātās audzes pusi, taču šīs atšķirības nav būtiskas.
9. Izpētes cismās paliekošās audzes koku kvalitātes izvērtējums pēc attiecīgajiem rādītājiem atbilst krājas kopšanas cirmu izpildes nosacījumiem Latvijā.

10. Krājas kopšanas ciršu harvesteriem nepieciešams uzstādīt promocijas darbā izstrādāto izvācamo koku uzskaites ierīci, kas paaugstinātu darbu izpildes ražīgumu un kvalitāti, kā arī nodrošinātu mežaudzes vienmērīgāku izkopšanu.
11. Pielietojot promocijas darbā nopamatoto mežizstrādes mašīnas koku aizsniedzamības modeļa principus, ieteicams izveidot datorprogrammu, ar kuru, veicot attiecīgus aprēķinus, būtu nosakāmi harvestera operatoram optimālākie pārbraucienu attālumi katrā konkrētajā cirsma daļā.

Darbā izvirzīta hipotēze, ka izpētot un pilnveidojot mašinizētas mežizstrādes tehnoloģiju krājas kopšanas cirtēs, iespējams uzlabot izkopto mežaudžu kvalitāti, nodrošinot vienmērīgāku atstāto koku izvietojumu, ir apstiprinājusies. To pierāda pētījumu rezultātos iegūtais 4., 5., 6., 7., 8., 10. un 11. secinājums.

Balstoties uz hipotēzi un veiktajiem pētījumiem, šajā darbā piedāvāti divi jaunievedumi:

1. izvācamo koku uzskaites ierīce harvesteram, kuras ieviešana praksē nodrošinātu augstāku darba ražīgumu un darba kvalitāti, kā arī mežaudzes vienmērīgāku izkopšanu;
2. matemātiski pamatotais mežizstrādes mašīnas izvācamo koku aizsniedzamības modelis, ar kura aprēķinu rezultātiem harvestera operatoram būtu nosakāmi optimālākie pārbraucienu attālumi katrā konkrētajā cirsma daļā.

GENERAL CHARACTERISTICS OF THE RESEARCH

Topicality

Forest as an ecological system goes through several stages in its development cycle. One of the most significant stages is that of medium age, when the new forest stand turns into a mature forest. Historically over a long period of time the dominant view was that in this period the growth of forest stand is self sufficient and the human's participation in this process is not needed. However, there were foresters who suggested establishing forest stands by using cutting methods, although the prevailing view was that the cutting of trees before the rotation is not needed.

In Western Europe it was the first sign of shortage of wood that made people pay serious attention to the forest as a rich and perspective resource of wood over the entire period of its growth. It was found that during the growth of the forest the number of trees over the period from young stand to mature forest can decrease even 15 times – from 10-15 thousand trees per ha to 400 - 800 trees per ha due to competition among the trees and also because of the impact of forest pests and diseases.

In order to compensate the shortage of wood, foresters started to cut down the trees which were stunted in growth, calling this activity – commercial thinning. Over time the opinions on forestry and silviculture changed, and it was acknowledged that by using commercial thinning it is possible to grow the forest and obtain additional amount of wood for the needs of economy. Commercial thinning of the standing volume improves the quality of trees ensuring a wider space for the trees to grow. The aim of the commercial thinning of the standing volume is to gain a maximum income from growing of the forest. In commercial thinning undesirable tree species are to be removed, as well as the diseased, damaged and suppressed trees of the main species and low value trees of the intermediary stand. If it is allowed according to regulations also the trees from the main stand (Buš, 1981) should be removed. As a result, target stand models suitable for particular forest growth types were developed in all the developed forestry countries.

Up to the 60s – 70s of the 20th century commercial thinnings were carried out in a non-mechanized way, using hand saws and horse traction power (Saliņš, 1997). An active and extensive introduction of new machines, mechanisms and technologies in logging promoted the use of commercial thinning. As a result of the use of logging machinery it was acknowledged that there is no universal machinery which would be suitable for both removal of big mature trees in final felling and small diameter tree felling in commercial thinning.

Alongside with the introduction of machine operated work in logging, the research into the factors influencing the use of forest machinery started. The task of machine operated technology in final felling is to ensure fast and effective processing of the trees to be cut and the movement of machinery under difficult driving conditions, whereas, when performing commercial thinning it is very important that the remaining stand is left healthy, eliminating the possible damages to the soil as well as the damages to the trunks and roots of the trees to be left, thus creating optimum growth conditions for the further development of the target stand.

A wide use of machine operated logging in commercial thinnings is still hampered by several economic and forestry related factors: the indicators of logging productivity in terms of industrial scope are not high enough, quite often the regulatory requirements of forestry related and ecological factors are not met.

The aim of the doctoral thesis

The aim of the thesis is to research the use of machine operated logging technology in commercial thinning in Latvia and to work out recommendations for the improvement of this technology.

Research tasks:

1. to clarify the factors affecting harvester productivity in commercial thinning;
2. to evaluate the level of tree reachability for harvester type machines in commercial thinnings;
3. to evaluate the quality of the stand thinned by a harvester;
4. to formulate the operation principles of tree reachability model for a logging machine;
5. to work out recommendations for improving machine operated logging technology in commercial thinning.

The following hypothesis has been verified within the framework of the research:

By researching and improving machine operated logging technology in commercial thinning it is possible to improve the quality of the thinned forests, ensuring a more even location of the residual trees.

Scientific novelty

A wide scale research on harvester operation in commercial thinnings has been summarized in the current work. Over the last 25 years no such comprehensive research of this kind has been conducted before. The current research should be considered as a continuation of logging machines' tree reachability theory, developed by the scientist Taņa Roziņa at the end of the 70s of the previous century continued by Aleksandrs Saveljevs at the end of the 80s. The results obtained from the research demonstrate the drawbacks of the logging technology used today and present the solutions to avert them.

Practical significance of the research

Basing on the research conducted, 2 innovations have been offered in this work:

1. A counting device for the harvester for counting the trees to be removed. The implementation of this device into practice would ensure higher productivity of work and work quality and it would also ensure a more uniform thinning of the stand;
2. A mathematically substantiated reachability model for the logging machine for reaching the trees to be removed, by calculation results of which the harvester operator would be able to determine the most optimal distances of the trips in each particular part of the felling site.

The structure and scope of the doctoral thesis

The research paper has been structured in 4 chapters:

1. Situation analysis, where the potential of commercial thinning in Latvia has been characterized, a historical insight into the development of machine operated logging has been presented and the current technology of commercial thinning has been presented. Additionally, an insight into foreign research with regard to the factors influencing the productivity of harvester and the reachability of the trees to be removed by harvesters working in commercial thinning has been presented.
2. Materials and methodology of research. The chapter deals with different types of experiments and the methodology of data gathering. Information about the sample plots, harvesters used in the research and also about the methods used in data processing has been presented.
3. Results and discussion. This chapter consists of three subchapters where some research results on harvester productivity, tree reachability and thinned stands' quality assessment have been presented.
4. Projects and innovations. This chapter deals with a description of a novelty – a counting device for the harvester for counting the trees to be removed, as well as mathematically substantiated reachability model for the logging machine for reaching the trees to be removed.

Overall, the thesis consists of 92 pages; information has been summarized in 14 tables and 51 figures; 124 sources of scientific literature have been used. It includes 9 conclusions and 2 recommendations for improving machine operated logging technology.

1. SITUATION ANALYSIS

The territory of Latvia occupies 6.46 mil. ha and the total area of forests is - 3.35 mil. ha, which accounts for 52 % of the state's territory. The forest territories have been increasing in recent years. Compared to other European countries, Latvia is one of the richest countries in terms of the forest cover. In Europe forests cover on average 33% of the land territory. When the trees grow the annual increment of wood occurs, which, according to the current data in Latvia is 16.5 mil.m³ per year. Latvia ranks among the leading European forestry countries with approximately 1.2 ha of forest land per capita (in Europe this figure is 0.27 ha of forest land). The countries surpassing Latvia in this respect are Finland, Sweden, Norway and Estonia (LVMI Silava, 2013).

Latvia's climatic and geographical conditions are favourable for forest growth, therefore the prime cost of the production of one cubic metre of wood is 1.3 times lower than in Scandinavian countries. From the beginning of the last century till present the forest areas in Latvia keep increasing (Fig.1.1). The increase in forest areas and growing stock are significant indicators of sustainable forest management.

The increase in forest areas is mainly attributed to the natural establishment of trees in the areas not used in agriculture, and it can also be explained by artificial afforestation of farmlands. According to the forest statistical inventory data these changes have taken place over the last 40 years (particularly in the last 10 years), when every year about 66 thousand ha of unmanaged farmland overgrows with forests. A purposeful establishment of forests also contributes to the increase in forest area. Overall, since the beginning of the last century, the forest area in Latvia has increased almost twofold and in the last twenty years – by 19% (LVMI Silava, 2013).

In Latvia the maximum allowable cut in commercial thinnings is not limited. According to the Forest law the commercial thinning is allowed in those cases when the basal area of the forest stand is greater than the minimum basal area or also in the cases when there are trees in the stand damaged and/or infested by pests, insects, diseases, and after the felling the basal area of the stand does not become smaller than the minimum basal area. According to the Latvian forest management cycle the thinning of each forest stand has to be performed 2 - 3 times, repeating it every 20 years. The first thinning should be performed when the stand has reached 20 – 30 years of age and it should be performed every 15 – 20 years. The last thinning is normally planned 20 years before the final felling.

The data shown in fig 1.2 testify that in the year 2013 in Latvia the wood processed and traded from commercial thinnings make up 12.4% of the total volume of wood. The greatest percentage – 79.7 % from the total volume of wood is obtained from final felling, but the remaining 7.9% - from other types of felling.

Until 2005 it was not possible to use a harvester in commercial thinning in Latvia because, according to the Cabinet Regulation No 217, the total area of strip roads arranged for performing commercial thinning in Latvia was not allowed to exceed 12% of the stand area. Thus, the distances between the strip roads were not allowed to be less than 30 m and therefore the length of the harvester boom could not ensure a uniform thinning of the stand between two strip roads along the whole area of the length of the forest strip. To improve the situation, amendments were made in the above mentioned Cabinet regulation on March 15 2005, which permitted the use of up to 20% of the total area of forest stand for arranging strip roads. Thus, it was possible to arrange strip roads at every 20 m, which significantly increased the efficiency of using harvesters in commercial thinning, ensuring cutting all the planned trees and hauling them to the strip roads, as well as processing of roundwood.

2. MATERIALS AND METHODS

From the situation analysis of Chapter 1, it can be deduced that the use of machine operated technology in commercial thinnings is a rather complicated and complex process. Expensive and innovative logging machines are involved in it and the operators who need to be professional in operating them, must acquire the basic knowledge of silviculture and know how to prepare high quality roundwood, corresponding to certain requirements. However, the implementation of these tasks in logging to some extent is limited by Cabinet regulations and several legislative acts.

Taking into account the above mentioned aspects, the current research deals with the use of logging technology in the work of harvester performing commercial thinning. Less attention has been paid to forwarding which is considered to be a simpler stage of logging process.

The design characteristics of the experiments conducted is shown in Figure 2.1.

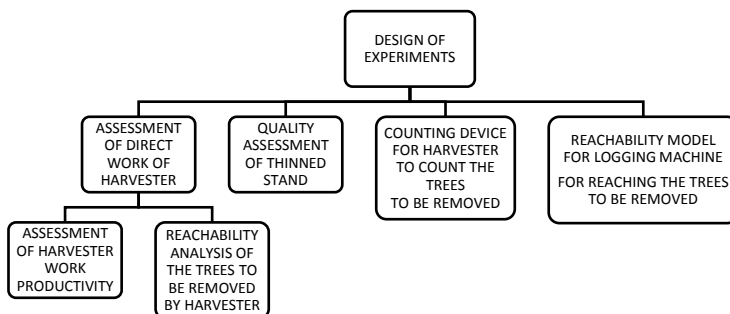


Fig. 2.1. The design characteristics of the experiments conducted.

As it is shown in Figure 2.1 the research of the thesis is dividend into four large groups:

1. assessment of harvester direct work, which is subdivided into work productivity assessment and the analysis of the reachability of the trees to be removed;
2. quality evaluation of the thinned stand after machine operated logging;
3. a counting device for the harvester for counting the trees to be removed;
4. a reachability model for the logging machine for reaching the trees to be removed. A visual tree stand model developed by means of mathematical methods and a computer programme which comprises a machine operated commercial thinning technology for a havester and the calculations of tree reachability for trees to be removed in diffrent situatons.

The data used in the research were collected in the period from 2008 to 2010: In 2008 approximately 200 thinning areas were surveyed in different stages of logging operations, starting from the initial stage – timber processing till the final stage – forwarding the roundwood assortments. Additionally control measurements were made and different observations were conducted. The information for the basic research was obtained from 12 different commercial thinning sites, were 600 sample plot groups were established. The harvesters of three most popular makes and models used in thinnings in Latvia were used in the tests: John Deere 1070, Ponsse Beaver and Valmet 901.4.

The research of harvester productivity was carried out in a different way with regard to stand characteristics: the harvester work time counting files from 100 different commercial thinning sites located in different areas of Latvia were used. The data obtained from the research have been summarized and statistically processed, using basically the software programme SPSS 17 and MS Excel. To completely reach the target tasks of the research, the T –tests, dispersion and correlation analyses have been carried out. In 2008 and 2009 the research was carried out in 12 different harvester operated commercially thinned felling sites, which were selected in geographically

different locations of Latvia – in the territory of JSC LVM Zemgale and Central Daugava forestries.

In all the researched felling sites the trees are dispersed. The stands where the trees are arranged in rows have not been investigated in this research. As the objects of research – the felling sites were divided by forest types (Fig.2.2): this figure distinctly shows that mainly all the selected sites are located on dry forest sites. It was done on purpose to eliminate different side factors which could impact the work of harvester during the experiments and thus also the results of the research.

Prior to the thinning, each felling site was prepared according to the specifics of the research and the aims to be reached. First, according to the traditional scheme, the strip roads were marked – 20 m between the strip road centres, the width of the strip roads - 4.0 m. To carry out the research in a rational way, the configuration of all the 12 sites has been chosen rectangular, which makes it easier to carry out certain experiments. The scheme of the site and the procedure of strip road logging are shown in Fig. 2.2.

After this type of logging, rectangular sample plots were established in the thinned stand; the area of each sample plot is 100 m² (Fig.2.3):

- Two outer sample plots – PL2 and PL3;
- Central sample plot, located in the middle section of the half-strip – PL1.

In all the felling sites included in the research the sample plots and strip roads have been established so that the sample plot PL3 would be located in that half-strip which the harvester processes to the side of the non thinned stand, whereas the sample plot PL2 – in the half-strip which is harvested towards the side of the thinned stand.

When establishing sample plots, the row of the stand between the strip roads is dividend into three equal parts. In most cases the width of the strip is 16.0 m, and therefore the length of each side of the sample plot is – 5.3 m. To have a sample plot with an area of 100 m², the length of the other side is 18.87 m. If the width of the strip is greater or smaller in some location of the felling site's sample plots, then correspondingly, the length of the row side has been determined in the way that the area of each sample plot in all the cases would be 100 m².

To determine the reachability of the trees for the harvester, the following procedures were carried out:

1. Assessment of the range of visibility from the cabins of diffrent make harvesters;
2. Assessment of harvester work in the prepared felling sites;
3. Assessment of harvester work at different pit stop distances.

To assess the range of visibility from the cabins of different harvesters, the traditional "shadow" methodology developed in 1974. – 1976. - ГОСТ 12.2.002-74 and ГОСТ 12.2.019-76 was used. Three different make and model commercial thinning harvesters were used in the experiments – Valmet 901.4, Ponsse Beaver and John Deere 1070d with different placement of cabins and harvester heads. The experiment was carried out during the dark period of the day, each model of the havester being in a stationary pit stop outside the forest stand. Afterwards, a rectangular area measuring 15 x 20 m was marked around the harvester with 4 stakes, so that the harvester would be in the centre of the area (Fig. 2.4). In the middle of the harvester cabin at the height of operator's head a powerful source of light – a bulb was attached. Again, using the stakes

the shaded parts of the sides of the rectangle's area were marked and measurements were made.

The obtained information was entered into the software programme SPSS 17 and for each harvester model the total shaded and visible parts of the area were calculated.

The work of the harvester has been evaluated in all the twelve felling sites, especially preparing forest stand half-strips between the strip roads. According to forestry requirements and taking into consideration the thinning model envisaged for each stand, prior to harvesting, in the half-strips adjoining every second strip road the trees to be removed were marked with fluorescent paint (Figure 2.6. II and IV strip road), and therefore the possibility that the harvester operator might not notice some tree to be removed is doubtful. Simultaneously with marking of the trees to be removed, their number was also counted. Before starting the work in all the prepared felling sites each operator was instructed so that when removing only the marked trees the work would be performed according to a specific technology and at a normal routine rate. When the work was accomplished the marked parts of the felling sites were surveyed and unremoved marked trees were counted. Then the data obtained were entered into the MS Excel electronic tables and the percentage of the unremoved marked trees of the stand was calculated. The results are presented in subchapter 3.2.2.

Additionally harvester's work assessment has been carried out depending on different pit stop distances in three commercial thinning sites:

- a) 2nd object, Engure tract, section 287 ;
- b) 9th research object, Vecumnieki tract, section 108;
- c) 10th research object, Misa tract, section 111.

A more detailed characteristics of sites is presented in Table 2.1.

In two felling sites – 2nd and 9th object – two identical make and model – John Deere 1070d – harvesters were working with identical – H 745 model working heads. The maximum length of the boom was – 10.0 m, which ensured the reachability of the trees at a distance of 10 m from the harvester centre. In the 10th research object Valmet 901.4 harvester was working and its reachability of trees was also 10.0 m. The research was carried out during several operator shifts, thus excluding the impact of the peculiarity of the operator work performance on the research results.

As it was in the previous research, the harvester was functioning identically in the prepared parts of the felling sites with marked trees. The task of the harvester operator – to follow one specific distance of the trips between the pit stops on the strip roads. The harvester pit stop changes are divided according to trips in three types of distances:

- short (1.5 – 2.0 m);
- medium (2.1 – 5.0 m);
- long (5.1 – 8.0 m).

For better understanding Fig. 2.5 illustrates the distance (A) of harvester trips (A) between the pit stops on the strip road.

The definite distance of the trips on the specific strip road was followed, and it was provided by the odometer (built in the harvester and the recording of the odometer was visible to the harvester operator on the computer monitor. The applied method is accurate enough and reliable. Therefore, the possibility that the operator could violate the limits of a definite trip distance, is insignificant.

Similar to the former experiment, also this time after harvester had finished its work, the demarkated felling site parts were surveyed and unremoved marked trees

were counted, recording after what trip distances in a definite strip road the harvester makes trips. Afterwards the data were entered into the MS Excel electronic tables and the percentage of unremoved marked trees of the stand was calculated.

The quality of the stand was assessed:

1. assessing the density of the stand;
2. assessing the quality of the trees to be left.

In the first experiment the density of the thinned stand at different distances from the strip roads were clarified. The research on the stand quality was done in specially prepared rectangular sample plots. In sample plots after thinning all the trees making up the residual stand were counted. Afterwards the number of trees in each sample plot was recalculated per ha. The obtained sample plot group data were processed using ANOVA. To determine the credibility intervals the T-test was also carried out. The quality of the trees to be left in the stand was assessed for the same 12 felling sites and in the same sample plots where the density assessment was carried out. Simultaneously with counting of the trees the quality of each remaining tree in the stand was assessed.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. The productivity of harvester in the stands of different composition

It has been established in the research how under Latvia's conditions harvester operates in commercial thinnings in the stands of different composition. The data about the productivity of harvester expressed as the volume of processed roundwood in cubic metres per time unit – an hour ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$) were used in the research. Summarizing the data from the selected 100 felling sites it has been established that in pure pine stands the average volume of the stem to be removed is 0.092 m^3 , in mixed stands – 0.085 m^3 and in pure spruce stands – 0.068 m^3 .

Unlike spruce and pine stands, there are comparatively few pure stands of medium age deciduous trees. Predominantly there are mixed stands of different composition which are usually found in moist areas, in fertile habitats and their typical feature is a great diversity of species. It has been clarified in the research how thinning under such conditions has affected harvester productivity; the results are shown in Tables 3.1. and 3.2.

Comparing the gradation classes, it was stated that harvester productivity differs considerably in pure stands of pine and spruce. It is shown in Fig.3.1 credibility intervals. The credibility intervals of mixed and also spruce and pine stands are similar: thus, the harvester productivity in mixed stands and pure coniferous stands does not differ significantly. Therefore, when thinning these stands, the dispersion range of harvester productivity indicators is quite wide, and, therefore, it will be difficult for the logger to predict the productivity taking into account also the composition diversity of mixed stands. In pure spruce stands where the standard deviations are the smallest, work productivity predictions will not create any problems.

Figure 3.1. shows that the harvester reaches its highest productivity when working in pure pine stands, the second highest – in mixed stands, but the lowest productivity - in pure spruce stands.

3.2. Harvester work timing in prepared and unprepared felling sites during the dark 24- hour period.

Using harvesters in commercial thinnings logging can be carried out throughout the 24- hour period. Taking into account the costs of purchasing these machines, long idle time of a powerful harvester is not permissible. Modern technical solutions ensure the fulfillment of almost all of the logging operations at any time of a 24 hour period and under different climatic conditions.

Analyzing foreign sources of research on machine operated commercial thinning it should be concluded that there is insufficient research carried out on harvester work in different periods of 24 h. As in modern production shift work is widely practised, the most important factor which could differently affect harvester productivity, is the work at light and dark period of 24 hours .

As it has been mentioned before, the operator carrying out commercial thinning should be competent in the issues of silviculture. Carrying out several experiments at night, it was stated that for the operator it is the selection of trees that is quite problematic at that time. Therefore timing of the harvester was performed using a chronometer for the full work accomplishment cycle when the operator was dealing with the first story of the trees to be removed during the dark time of the 24 hour period. In certain parts of the felling site the trees to be removed were marked with a fluorescent paint, but in the remaining parts the harvester operator selected the trees to be removed according to his/her own discretion.

For the processing of harvester timing data the T-test was used.

Figure 3.2. shows that the mean/average time spent on the processing of the marked and unmarked trees to be removed differs significantly, because the calculated credibility intervals do not overlap. From Fig. 3.2. it can be concluded that the average work time spent on the processing of the marked trees to be removed is by 15% less than logging unmarked trees. It testifies that when the harvester works in the dark time of the day the productivity of work in the prepared parts of the felling site will be considerably higher than in unprepared parts of the felling sites. Taking into account such considerable tree processing cycle time differences, logging companies should use marking of the trees to be removed in those areas of the stands, where machine operated thinning has been envisaged at night. In this research the tree marking procedure took $\approx$ 1 man hour per ha., on the condition that marking is carried out over the entire area of the felling site.

3.3. Assessment of the visibility range from the cabins of different make harvesters

The visibility range was assessed from the harvester operator's work place – the cabin. The experiments were carried out according to the previously mentioned "shadow" method, with three different make and model commercial thinning harvesters (Valmet 901.4, Ponsse Beaver and John Deere 1070d), which have different location of cabins and booms.

The data obtained for each type of harvester have been summarised in Table 3.3 and graphically illustrated in Figure 3.3.

With the measuring units (m) included in Table 3.3 the length of that perimeter part of the research rectangle is expressed (Fig.2.4.) which is divided into the shaded part and part not covered by shade or visible part of the field. The total rectangle perimeter is 70 m.

From Fig.3.3 it can be concluded that the range of uncovered field of visibility, looking from the operator's cabin of harvesters of different make is different. It is better in the case of Ponsse Beaver commercial thinning harvesters in which the uncovered field part is the greatest – 63%. The second best parameter is that of John Deere 1070 harvesters – 60%, but the worst is that of Valmet 901.4 harvesters that can be explained by a peculiar placement of the harvester boom in relation to the cabin. The range of visibility is one of the main parameters which should definitely be considered when purchasing a harvester. It has been acknowledged also by some researches of harvester ergonomics from Scandinavian countries (Brunberg, 1997; Lageson, 1997).

3.4. Assessment of harvester work in prepared felling sites

The reachability observations of the trees to be removed were made according to a specially prepared technology and rate, removing only the marked trees which were previously counted in each felling site. After the thinning the number of marked unremoved trees was counted.

From Table 3.4 it can be concluded that on average 4.9 % of the trees to be removed have been left in the stand just because they were unreachable. To avoid decreasing the intensity of work, harvester operators sometimes remove only those trees which are easier to reach, deliberately ignoring forestry requirements. Honest harvesting companies sometimes after thinning of the stand appoint foresters to use manual power saws to cut the trees which have not been reached by the harvester.

3.5. Assessment of harvester work at different pit stop distances

Harvester pit stops and pit location changes on the strip road have been mainly analyzed in ergonomic and technological researches. Within the framework of current research the harvester work in commercial thinnings has been assessed at different distances of pit stops, namely – the possibility of the harvester to reach the marked tree which has to be removed from a definite pit stop. The pit stop changes have been grouped according to the distance of the trips:

- short (1.5 – 2.0 m);
- medium (2.1 – 5.0 m);
- long (5.1 – 8.0 m)

Similar to the previous experiments these experiments have also been conducted in a specially prepared felling site parts, where the trees to be removed were marked before the thinning. After the harvester work on each strip road the marked but unremoved trees were counted, recording also which trip distance on a definite strip road the harvester has covered. The data have been summarized and processed with MS Excel; taking into consideration the distance of each definite trip, the number of marked unremoved trees was calculated. The results are shown in Fig. 3.4.

It can be concluded from Fig. 3.4 – the longer the distance for the harvester to cover, the greater the number of unremoved trees. By increasing the distance of the trips, the reachability of trees and the quality of the thinned stand decrease.

In practice the harvester operator adjusts the trip distance to the definite situation of the location in the stand. If the stand is thicker/denser in some place and more trees are to be removed, the trip distance along the strip road will be shorter/less – mazāks, but if the stand in a definite location is thinner the trip distance will be longer. Short distance trips take longer time for harvester to thin a definite place, resulting in lower productivity. It can also be one of the reasons why operators sometimes choose too long trip distances.

3.6. Density assessment of the thinned stand

The density of the thinned stand at different distances from the strip roads has been assessed in the research. The strip of the stand between the strip roads was divided into three identical parts, establishing one rectangular sample plot in each of them. The area of the sample plot was 100 m^2 (Fig.2.3). The sample plots had a definite number of the trees which was calculated per ha. The sample plots were chosen so that the sample plot group PL3 could be thinned toward the direction of the unthinned stand, but the second outer sample plot group PL 2 adjoining the thinned part of the stand.

The obtained information about the sample plot groups was processed using the Analysis of Variance (ANOVA). In order to obtain the credibility intervals of the mean parameters of the data, the T-test was also carried out. The results are shown in Table 3.5. Figure 3.5 shows the results in graphical way.

From Fig.3.5. it can be concluded that different conditions of the reachability of the trees to be removed can be the reason to the situation when in the middle part of the strip of the forest stand - between the strip roads - considerably more trees have been left for further growth than on the sides of the strip adjoining the the strip road. Thus, the forest stand has been thinned non-uniformly mainly due to unreachability of trees, shortcomings in machine operated technologies and sometimes due to operators' negligence and carelessness.

When working on the strip road, the harvester operator assesses differently both parts of the adjoining half - strips: the half - strip located next to the thinned part of the stand is thinned more intensively than the half - strip in the direction of the unthinned part of the stand, but the differences are not significant.

4. PROJECTS AND NOVELTIES

4.1. The counting device of the trees to be removed for the harvester

In commercial thinnings one of the main and controllable requirements of forestry is a sufficient basal area of the residual stand. Another requirement is a uniform layout of the stand, i.e. – to have an identical or similar number of trees per each unit of the thinned area.

As the problem mentioned above is important, when carrying out a machine operated commercial thinning, this research focuses on finding a possible solution – to create a counting device for the harvester to record the trees to be cut.

First, mathematical analysis of harvester work zones should be carried out. To use a logging machine – harvester – in commercial thinnings it is important that its technical parameters suit the conditions of work environment. Assessing the suitability of harvesters to commercial thinning, the specialists agree that the main problem here is the reachability of the trees to be removed, i.e., a mechanical gripping of the trees which have to be cut and performing of the further manipulations to follow, so that later the logs arranged by the assortments could be moved from the forest to the landing. The most important aspect in this work is the selection of trees to be removed and gripping them with the work head of the the harvesting machine.

For operation system control special software packages are used. In John Deere machines it is „Timbermatic™ 300” When the harvester works the „Timbermatic™ 300” system controls the harvester head's lifting frame, feeder rollers, delimbing knives and sawing, but during the feeding of stems it constantly follows the numerical values of the stem length and diameter and the condition of the saw bar during the sawing process.

Chapter 3.6. of the summary includes the results of the experiments: in the middle part of the row – between the strip roads – much more trees have been left than on the edges of the row next to the strip road. In practice the control of observing the requirements often takes place after the accomplishment of thinning and the information obtained only states the facts. To avert the revealed shortcomings one should turn back to the initial stage of work, which would make the technological harvesting process much more expensive and prolong it considerably.

Previously mentioned results in chapter 3.6, testify that in harvester operation control system it is necessary to switch on a control mechanism which would record the locations of the trees to be removed with regard to the strip road.

The obtained theoretical location control algorithm of the trees of the residual stand after the commercial thinning is based on the following assumptions:

1. initially the location of all trees in the felling site is uniform;
2. the trees to be removed are located among the trees to be left for growing in the felling site;
3. harvester operator in each pit stop of the strip road thins both adjoining rows and both sides of the middle row (Fig. 4.1);
4. in one work pit stop the number of the removed trees is proportional to that area which can be processed by the harvester head.

Taking into account the assumptions mentioned above, the possibilities of harvester boom in the horizontal plane of the work zone have been evaluated (Fig.4.1).

According to technical specifications the shape of the harvester boom work zone is 270° of a full circle with a maximum radius of 10.0 m and minimum radius of 2.0 m, and it is symmetrical to the strip road longitudinal axis. Using the common formula of the area of a circle the total area of the work zone (S) is as follows:

$$S = (\pi \times R^2 \times 0.75) - (\pi \times r^2 \times 0.75) , \quad (4.1.)$$

where:

$$\pi = 3.14;$$

R- maximum boom reach ;

r – minimum boom reach;

0.75 – coefficient characterizing the angular parameter of the work zone.

The calculations show that the total area S equals 226 m², but , since in that part of the work zone where the strip road will be laid all the trees are envisaged to be cut, it should be excluded from the total area S. Thus, in the work zone where a uniform location of the remaining trees should be ensured, S_d is calculated according to the following formula:

$$S_d = S - S_{tk} , \quad (4.2.)$$

where

$$S_{tk} = 4 \times (R-r) , \quad (4.3.)$$

As a result S_{tk} = 32 m² and S_d = 194 m².

Taking into consideration that the harvester works on both sides of the strip road S_d / 2 = 97 m². In 1976, T. Roziņa found out that the most suitable optimum trip for the boom type of forest harvesting machines is a trip which matches the length of

the base machine (3-5 m), and using it 92% of the trees to be removed can be reached (Розинь, 1978). This parameter was acceptable in the 80s of the 20th century, but nowadays it no longer meets the forestry requirements of commercial thinning.

Figure 4.1. shows that the cutting of trees is performed both in the first row and in the half of the middle row of the forest stand. Using the formulae of geometric shape area determination, the work area of the 1 st row is determined as a complicated sum of areas S_1 , but the work zone area in the middle row – as a difference between:

$$S_2 = (S_d/2) - S_1 \quad (4.4.)$$

The calculations show that: $S_1 = 63.5 \text{ m}^2$ and $S_2 = 33.5 \text{ m}^2$.

Taking into consideration the assumptions mentioned before concerning the uniform location of the trees to be removed in the felling site, the work zone relation by rows will relate also to the proportion of the number of the trees to be removed:

$$\frac{S_2}{S_1} = 33.5 \div 63.5 = 0.53 \text{ vai otrādi (1.89)}$$

At each harvester pit stop in the row adjoining the strip road, the number of removed and processed trees (from 2.0 m to 7.0 m of the boom position) should be 1.89 times more than in the half strip of the farthest work zone middle part. Controlling the above mentioned relationship, it is possible to achieve an identical number of remaining trees per unit of area (e.g.. 100 m^2) in the thinned strips and also the number of the trees to be left in all the rows between the strip roads will be close to identical. In the forest stand thinned in this way the location of trees will be uniform. Basing on these theoretical calculations a harvester operation control system can be implemented which will allow the harvester operator to achieve a more uniform location of the remaining trees in the thinned tree stand.

The angular control sensors attached to the boom head's rigid part and the signals are received by the receiver attached to the movable column of the boom. The boom reach control sensor is positioned in the articulated place of the boom at the farthest point of the telescopic section. By monitoring the turn angle and parameter of the boom, the work zone is calculated where the tree to be cut is located. For instance, if the harvester working head is within a range of angle (τ) and the boom reaches are 2.82 m – 7.0 m, then the tree to be cut is located in the adjoining row. As soon as the boom reaches the angle (α) , at the boom reaches of 7.0 m - 10.0 m $(\omega_1 - \omega)$, the removal of trees should be done in the middle row. The same happens when the boom is in the angular sector like in the opposite side of the strip road mirror image. The obtained information is to be entered into the on-board computer of the harvester, or a computing device has to be added to the operating control system.

4.2. Reachability model for the logging machine for reaching the trees to be removed.

For implementing the system "harvester – work environment" it is necessary to develop a forest stand model suitable for logging work. Nowadays several different models have been developed:

1. forest stand models without territorial location of individual trees;
2. forest stand models with the coordinates of the location of individual trees.

Only forest stand models with the coordinates of the location of trees are suitable for the assessment of the reachability of the trees to be removed, since harvester works in a

horizontal plane. Concerning the aspect of reachability, the parameters of assessment are not so essential, but the coordinates (x_i ; y_i) of the mathematical centre point of the trees to be removed are necessary indeed. If needed, the forest stand model can be supplemented with the necessary parameters, for instance, tree diameter, height, etc, which will make the application of the model more accurate.

For the forest stands of Latvia the following locations of forests are typical:

- 1) uniform location or spread;
- 2) uniform location according to geometrical principle (row plantings);
- 3) location of trees in groups (mainly in black alder stands).

As only the performance principles of the tree reachability model have been dealt with in this research, the first variant will be viewed in a more detailed way. According to the law of probability at uniform location of trees the coordinates of mathematical centres of trees are expressed by the following formula:

$$\begin{aligned} X &= \gamma \cdot A \\ Y &= \gamma \cdot B \end{aligned} \quad (4.5.),$$

where:

γ – randomly generated number in the interval [0,1];

A, B – parameters of the forest stand rectangle (m).

In this case the forest stand modelling is simplified, and it is sufficient enough to determine the reachability of the trees to be removed when using a forest harvesting machine.

To better understand the tree reachability model it is worth analyzing an example: The felling site is of square shape - 100 m x 100 m = 1 ha, 1000 trees per ha. Let us assume that the stand is made up of single species and single-sized trees (Fig. 4.2.). The distance between the strip roads – 20 m, the width of the strip road - 4 m. The task of the harvester operator – to process this area, removing 40 % of the trees from the stand, always performing only the long trip distance - 8 m – between pit stops.

As all the strip roads are identical and only their location differs. Let us view only one of them and assess the situation according to the stand which is to be modelled.

The area of one strip road:

$$S = 4\text{ m} \cdot 100\text{ m} = 400\text{ m}^2, \text{ which occupies } \frac{400}{100 \cdot 100} = 0.04, \text{ or } 4\%$$

from the total area of the stand. Therefore on the strip road there should be 4% of all the trees, thus, modelling a forest stand of such example on the first strip road there are 36 trees, which approximately corresponds to 4%. Analyzing the remaining four strip roads, the situation is slightly different: there is a little less than 4% on one strip road, but on another one – a little more trees.

Since the trees to be removed account for 40% of all the 1000 stand trees,, 40% of 1000 makes 400 trees to be removed. Half of them, i.e. 200 trees, are located on the strip roads, thus the remaining 200 trees to be removed could create a reachability problem for the harvester.

Let us turn to the harvester uncovered work zone of the left forest stand half-strip of the first strip road (Fig. 4.3.) Viewing the orange segment of the area it can be stated that it is a rectangular triangles, whose hypotenuse is 10 m and cathetus respectively.

Then the segments of the triangle is m². From total area of the stand it occupies $\frac{25}{100 \cdot 100} = 0.0025 = 0.25\%$. The corresponding number of trees in this area/square could be 2.5; in this particular example it is one tree (int.al.- the one to be removed) which grows very close to the work zone.

Let us view the blue segment of the area (Fig. 4.3.). Viewing the rectangle whose initial point of coordinates coincides with its top, but the machine's centre with the opposite top of the rectangle, the area of the corresponding segment should be calculated if the sector's area and the corresponding area of the isosceles rectangular triangle is taken away from the rectangle area.

$$\begin{aligned} S_{\text{taishn}} &= ab = 10 \cdot 7.1 = 71 \\ S_{\text{trijst}} &= \frac{a^2}{2} = \frac{7.1^2}{2} \approx 25.21 \\ S_{\text{sekt}} &= \frac{\pi R^2 \cdot \varphi}{360^\circ} = \frac{\pi \cdot 10^2 \cdot 45^\circ}{360^\circ} \approx 39.27 \\ S &= 71 - 25.21 - 39.27 = 10.52 \end{aligned} \quad (4.6.)$$

This area makes up a part from the whole area: $\frac{10.52}{100 \cdot 100} \approx 0.0011 = 0.11\%$ or 1.1 trees. In this case there is one tree to be left.

The green segment can be divided into two parts. The calculation will be done only for a half of the area, increasing the obtained result twice, then 11 times, since there are 11 areas of such kind.

Let us determine the crosspoint of two circumferences, using the equations of circumferences:

$$(x - 10)^2 + (y - 7.1)^2 - 10^2 = (x - 10)^2 + (y - 15.1)^2 - 10^2$$

As a result the following is obtained $y = 11.1$, then $x = 0.83$.

$$\begin{aligned} S_{\text{segm}} &= \frac{1}{2} R^2 \left(\frac{\pi \varphi}{180^\circ} - \sin \varphi \right) \\ S_{\text{segm}} &= \frac{1}{2} \cdot 10^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 23.58^\circ}{180^\circ} - \frac{4}{10} \right) \approx 0.58 \\ S &= 4 \cdot \left(10 - \sqrt{10^2 - 4^2} \right) - 0.58 \approx 2.74 \end{aligned} \quad (4.7.)$$

Surveying all the work zones of the harvester where the machine's /travelling distance was 8 m, it was stated that in the researched felling site (example) within the framework of the harvester's work zone, 4 trees to be removed will not be reachable and one tree will be outside the zone, so in total it will be 5 trees.

Consequently, in terms of percentage, in this theoretically assumed situation, 2.5 % of the trees to be removed will not be reachable by the harvester.

Likewise the number of trees to be removed which would not be reachable at different density of the stand, location of trees in it and different harvester travel distances.

By substantiating the principles of the forest harvesting machine's tree reachability it is possible to develop a software to be used in calculating the optimum distances for the harvester operator to travel under conditions of a definite stand. In order to have convincing results from the use of this software, initially more detailed information should be gathered on the stand and its assessment parameters:

- layout of trees;
- composition of species;
- forest storeys;
- initial density of the stand;
- average diameters of the trees to be kept and the trees to be removed , etc.

Knowing the diversity of Latvia's forests it should be noted that the calculations which were done could successfully be used to process uniform pure stands and the stands with row plantations. Using the developed tree reachability model for the trees to be removed, the optimum distance (rate) of harvester's trips and the number of the trees to be removed from each half-strip should be calculated.

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

1. In commercial thinning the harvester reaches the highest productivity in pure pine stands – $3.96 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$, at the average volume of the tree stem to be removed 0.092 m^3 . The second highest work productivity was recorded in mixed stands – $3.67 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$, at the average volume of the trees to be removed 0.085 m^3 , whereas the lowest - in pure spruce stands – $3.09 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$, at the average volume of the tree stem to be removed 0.068 m^3 . Carrying out the comparison of the gradation classes it was established that the work productivity of harvester in pure pine and spruce stands differed significantly.

The calculated harvester productivity standard deviations were the highest in mixed stands, but the lowest in pure spruce stands. It means that when thinning different mixed stands the work productivity parameters are dispersed in quite a large range which will make it more difficult to predict the productivity of the harvester in each felling site of the mixed stand.

2. In commercial thinnings harvester's average time used in performing work operations for processing one tree in each of the stand's storeys is considerably different: for the processing of the first storey trees the harvester needs twice as much time compared to that of the second storey trees. Comparing the Standard deviations and minimum and maximum work time units it has been stated that the chronometered times spent on processing the first storey trees have been dispersed in a much wider range compared to the chronometered times spent on the processing of the second storey. It is explained by the peculiarities of the stems and crowns of the first storey trees to be removed (double stems, double tops, separate thick branches, etc.).
3. When the harvester operates in the dark hours of the 24h day the average processing time of the marked trees to be removed is by 15% less than processing unmarked trees. The average processing time for marked and unmarked trees to be removed differs significantly.
4. For different makes of harvesters when looking from the operator's cabin, the uncovered range of field does not uniformly include the processing field: Ponsse Beaver harvesters used in commercial thinning have the largest part of the uncovered view field, to be followed by the second best - John Deere 1070 harvesters, whereas Valmet 901.4 harvesters have the worst range of view field,

which can be explained by a peculiar placement of the boom - in relation to the cabin.

5. Performing the machine operated commercial thinning, on average approximately 4.9 % of the trees to be removed are left in the stand just because of unreachability of trees.
6. When the harvester makes longer distances moving between the pit stops in the process of work, the reachability of the trees to be removed worsens. As a result, the quality of the thinned stand decreases.
7. Different conditions of tree reachability is the reason that in the middle part of the forest stand strip between the strip roads a considerably greater number of trees is left for further growth (15% to 35%) than on the sides of the strips, close to the strip road. Thus the forest stands are not thinned uniformly.
8. When the harvester operator works on the strip road of the stand he/she sees both adjoining half-strips differently: the half-strip which lies close to the thinned/processed part of the stand is processed more intensively than the half-strip toward the unprocessed stand, but these differences are not so important.
9. The assessment of the tree quality of the remaining stand in the research felling sites according to definite parameters corresponds to the requirements set for performing commercial thinning in Latvia.
10. It is necessary to equip the harvester with the device for counting the trees to be removed which was developed and described in the doctoral thesis. Using this device the productivity and quality of work will be enhanced and more uniform thinning process of the forest stand will be ensured.
11. Using the principles of the tree reachability model for harvesting machines substantiated in the research, it is recommended that a software program should be developed with which the optimum travel distances for the operator could be determined in each part of the felling site.

The hypothesis that by researching and improving the machine operated forest harvesting technology in commercial thinnings it is possible to improve the quality of the thinned stands, ensuring a more uniform layout of the residual trees, has been also proved. It has been proved by the conclusions 4., 5., 6., 7., 8., 10. and 11. obtained from the results of the research.

Basing on the hypothesis and the research carried out, two innovations have been offered in the thesis:

1. a counting device for the harvester for counting the trees to be removed. By putting this device into practice a higher productivity and work quality would be reached, and also a more uniform thinning of the stand could be reached;
2. a mathematically substantiated reachability model for the logging machine for reaching the trees to be removed. By using the results of the calculations of this model the harvester operator would determine the optimum travel distances in each part of the felling site.