Mg. agr. **Madara Misule**

AUGU MAIŅAS PRODUKTIVITĀTE ATKARĪBĀ NO ZIEMAS KVIEŠU ĪPATSVARA TAJĀ UN AUGSNES APSTRĀDES SISTĒMAS

PRODUCTIVITY OF CROP ROTATION DEPENDING ON WINTER WHEAT PROPORTION IN IT AND SOIL TILLAGE SYSTEM

Promocijas darba **KOPSAVILKUMS**
zinātnes doktora grāda (Ph.D.) iegūšanai
lauksaimniecības, meža un veterinārajās zinātnēs

SUMMARY
of the Doctoral Thesis for the Scientific Degree Doctor of Science (Ph.D.)
in Agriculture, Forestry and Veterinary Sciences

Jelgava
2024

Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitāte
Latvia University of Life Sciences and Technologies

Lauksaimniecības un pārtikas tehnoloģijas fakultāte
Faculty of Agriculture and Food technology

Mg. agr. **Madara Misule**

AUGU MAIŅAS PRODUKTIVITĀTE ATKARĪBĀ NO ZIEMAS KVIEŠU ĪPATSVARA TAJĀ UN AUGSNES APSTRĀDES SISTĒMAS

PRODUCTIVITY OF CROP ROTATION DEPENDING ON WINTER WHEAT PROPORTION IN IT AND SOIL TILLAGE SYSTEM

Promocijas darba KOPSAVILKUMS

zinātnes doktora grāda (Ph.D.) iegūšanai
lauksaimniecības, meža un veterinārajās zinātnēs

SUMMARY
of the Doctoral Thesis for the Scientific Degree Doctor of Science (Ph.D.) in Agriculture, Forestry and Veterinary Sciences

Jelgava
2024

Darba zinātniskā vadītāja / *Scientific supervisor:* Dr. agr. **Zinta Gaile**

Darba recenzenti / *Reviewers*: Dr. agr. **Arta Kronberga**
Dr. agr. **Sanita Zute**
Dr. agr. **Līvija Zariņa**

Promocijas darba aizstāvēšana paredzēta Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes Lauksaimniecības un zivsaimniecības zinātnes, mežzinātne ar specializāciju "Lauksaimniecībā" Promocijas padomes atklātajā sēdē 2024. gada 13. jūnijā plkst. 10:00, Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātē, 123. auditorijā, Lielā ielā 2, Jelgavā
The defence of Thesis *will held in open session of the Promotion Board in Promotion Board in Field of Agriculture and Fisheries Sciences, Forest science with specialization in "Agriculture" on 13 June 2024 at 10:00 AM in room 123, Latvia University of Life Sciences and Technologies, Liela Street 2, Jelgava.*

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes Fundamentālajā bibliotēkā, Lielā iela 2, Jelgava.
The thesis and summary are available *at the Fundamental Library of Latvia University of Life sciences and Technologies, Lielā Street 2, Jelgava.*

Atsauksmes lūdzu sūtīt Lauksaimniecības un zivsaimniecības zinātnes, mežzinātnes ar specializāciju "Lauksaimniecība" promocijas padomes sekretārei Dr. sc. ing. Ingrīdai Augšpolei, Lielā iela 2, Jelgava, LV-3001.
References are welcome to be sent to Dr. sc. ing. Ingrīda Augšpole, the Secretary of the Promotion Board in Agriculture, Forestry, and Fisheries with specialization in "Agriculture", Latvia University of Life Sciences and Technologies, Liela Street 2, Jelgava, LV-3001.

Darba pabeigšanu atbalstīja ESF projekts Nr. 8.2.2.0/20/I/001 „LLU pāreja uz jauno doktorantūras finansēšanas modeli"
The completion of the work was supported by the ESF project No. 8.2.2.0/20/I/001 "Transition of LLU to the new doctoral funding model"

NACIONĀLAIS ATTĪSTĪBAS PLĀNS 2020

EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Sociālais fonds

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

SATURS / *CONTENT*

IEVADS 4
PĒTĪJUMA APSTĀKĻI UN METODIKA 7
Pētījuma vietas raksturojums 7
Pētāmo variantu apraksts 8
Agrotehnika izmēģinājumā 10
Izmēģinājumā veiktie novērojumi un analīzes 13
Meteoroloģisko apstākļu raksturojums 18
REZULTĀTI 20
Ziemas kviešu augšana un attīstība, ražas veidošanās 20
un kvalitāte 20
Pārējo pētīto kultūraugu ražas un kvalitātes veidošanās 28
Augu biomasas enerģijas raža 34
Organiskā oglekļa uzkrāšanās augsnē 37
Augu maiņu un augsnes apstrādes sistēmu kombināciju ekonomiskais novērtējums 39
SECINĀJUMI 44
PATEICĪBAS 46

INTRODUCTION 48
MATERIALS AND METHODS 51
Description of the study site 51
Variants of field experiment 51
Agrotechnics in the trial 52
Observations and analyses performed 54
Characterization of meteorological conditions 57
RESULTS 59
Winter wheat growth and development, yield and quality 59
Yield and quality of other studied crops 64
Energy yields of plant biomass 66
Accumulation of soil organic carbon 67
Economic assessment of crop rotation and soil tillage systems combinations 69
CONCLUSIONS 71
ACKNOWLEDGEMENTS 73

IEVADS

Pieaugošais pasaules iedzīvotāju skaits ir izaicinājums pārtikas un enerģijas ražošanas nozarēm, kā arī citu pamatvajadzību nodrošināšanai. Zemes, augsnes un ūdens resursi ir ierobežoti un pakļauti klimata izmaiņām. Lauksaimniecībai ar esošajiem resursiem ir jāiegūst lielāka kultūraugu produktivitāte. Lai novērtētu ilgtspējīgas kultūraugu ražošanas iespējas, ir jāvērtē kultūraugu audzēšana ilgākā periodā par vienu gadu – augu maiņas vai augsekas ciklā. Ar viengadīgu datu novērtējumu kultūrauga audzēšanas ieguvumiem un ieguldījumiem nav pietiekami, ir jāvērtē visa audzēšanas sistēma kopumā vairāk nekā sezonas garumā.

Kultūraugu produktivitāti un audzēšanas rentabilitāti var ietekmēt vienkāršas agronomiskas prakses – augu maiņa un augsnes apstrādes sistēma, bet atkārtotu sējumu un nepiemērotas augsnes apstrādes sekas lielākoties tiek mīkstinātas ar sintētisko mēslošanas līdzekļu un augu aizsardzības līdzekļu lietošanu. Latvijā pēdējie pētījumi, kuros salīdzināta dažādu augu maiņu produktivitāte, ietverot arī augsnes apstrādes sistēmas, veikti 20. gadsimta beigās (1986.–2002. gads). Mainoties audzēšanas tehnoloģijām un tendencēm pasaulē un ņemot vērā globālās klimata izmaiņas, arī mūsdienās ir aktuāli pētīt augu maiņu un augsnes apstrādes sistēmu ietekmi uz kultūraugu produktivitāti gan sugas ietvaros, gan vērtējot augu maiņu garākā periodā. Tā kā augu maiņā tiek ietvertas dažādas sugas, tad produktivitātes salīdzinājums tonnās (t ha^{-1}) nav pietiekami objektīvs, tāpēc salīdzināšanai var tikt izmantota biomasā akumulētā enerģijas raža (GJ ha^{-1}) vai bruto peļņa (EUR ha^{-1}). Svarīgi pētīt arī augsnes apstrādes un augu maiņas ietekmi uz organiskā oglekļa krājumu palielināšanas iespējām augsnē Latvijas apstākļos, lai risinātu pasaules mēroga problēmu – globālo klimata izmaiņu. Oglekļa satura izmaiņas augsnē novērojamas ilgtermiņā, tāpēc nozīmīgi oglekļa daudzumu augsnē salīdzināt ilggadīgā augu maiņu un augsnes apstrādes sistēmu izmēģinājumā.

Darba hipotēzes

1. Samazinot ziemas kviešu īpatsvaru augu maiņā, uzlabojas ziemas kviešu produktivitāte (t ha^{-1}) un pieaug kopējā augu maiņā akumulētās enerģijas daudzums (GJ ha^{-1}) un ziemas kviešu ražošana ilgtermiņā ir ekonomiski izdevīgāka (EUR ha^{-1}).
2. Līdzvērtīgas ziemas kviešu ražas iespējams iegūt, pielietojot gan tradicionālo, gan reducēto augsnes apstrādes sistēmu.

Promocijas darba mērķis

Skaidrot augu maiņas produktivitāti atkarībā no ziemas kviešu īpatsvara tajā un pielietotās augsnes apstrādes sistēmas.

Pētījuma uzdevumi

1. Vērtēt ziemas kviešu augšanu un attīstību atkarībā no augu maiņas un augsnes apstrādes sistēmas.
2. Noteikt ziemas kviešu ražas un tās struktūrelementu veidošanos atkarībā no augu maiņas un augsnes apstrādes sistēmas.
3. Vērtēt ziemas kviešu ražas kvalitāti atkarībā no pētāmajiem faktoriem.
4. Vērtēt pārējo augu maiņās iekļauto kultūraugu produktivitāti divās augsnes apstrādes sistēmās.
5. Noteikt pētāmo faktoru ietekmi uz ziemas kviešu un citu augu maiņā iekļauto kultūraugu enerģijas ražu un kopējo augu maiņas enerģijas ražu.
6. Vērtēt organiskā oglekļa uzkrāšanos augsnē atkarībā no pētāmajiem faktoriem.
7. Aprēķināt un analizēt augu maiņas ekonomisko izdevīgumu atkarībā no kviešu īpatsvara tajā un augsnes apstrādes varianta.

Aizstāvāmās tēzes

1. Ziemas kviešu ražas pieaug, dažādojot augu maiņu; tradicionālās un reducētās augsnes apstrādes sistēmās kviešu attīstība notiek un ražas struktūrelementi veidojas līdzvērtīgi, kā arī iespējams iegūt līdzvērtīgas ražas.
2. Abas pētītās augsnes apstrādes sistēmas (tradicionālā un reducētā) lielākoties nodrošina savstarpēji līdzvērtīgu sēklu ražu sugas ietvaros ziemas rapsim, vasaras miežiem un lauka pupām.
3. Augu maiņas dažādošana var nodrošināt augstāku tās enerģijas ražu, bet augu maiņā iekļauto laukaugu ietekme uz augu maiņas kopējo enerģijas ražu ir atkarīga no meteoroloģiskajiem apstākļiem vērtēšanas periodā.
4. Ilgtermiņā, atstājot pēcpļaujas atliekas uz lauka, iespējams paaugstināt augsnes organiskā oglekļa saturu neatkarīgi no pētītajiem augsnes apstrādes vai augu maiņas variantiem.
5. Augsnes apstrādes dziļuma samazinājums smaga putekļaina māla augsnē ir finansiāli maznozīmīgs, tomēr augu dažādošana augu maiņā var nodrošināt lielāku bruto segumu.

Darba novitāte: Latvijā līdz šim nav veikts komplekss pētījums, kurā tiktu vērtēti vairāki augu maiņas varianti un divas augsnes apstrādes sistēmas stacionārā, vairāku gadu (8–10) garumā ilgušā izmēģinājumā, lai skaidrotu ieguvumus (ražība, enerģijas raža, ekonomiskais izdevīgums, oglekļa uzkrāšanās augsnē) no kultūraugu dažādošanas augu maiņās, salīdzinot ar kviešu bezmaiņas sējumiem. Pētījums sniedz iespēju secināt, cik produktīvi ir ilgstoši sēt ziemas kviešus bezmaiņas sējumos tieši Latvijas apstākļos, kā arī novērtēt dažādu augsnes apstrādes sistēmu ietekmi uz to produktivitātes rādītājiem. Tieši Latvijas apstākļos trūkst pētījumu par augu maiņas un augsnes apstrādes sistēmas ietekmi uz oglekļa uzkrāšanos augsnē ilggadīgā pētījumā.

Promocijas darba izstrādes līdzfinansējums saņemts četru projektu ietvaros.

1) VPP AgroBioRes "Lauksaimniecības resursi ilgtspējīgai kvalitatīvas un veselīgas pārtikas ražošanai Latvijā", 1. daļa Augsne "Augsnes ilgtspējīga izmantošana un mēslošanas risku mazināšana".
2) LR Zemkopības ministrijas subsīdijas, projekts "Minimālās augsnes apstrādes ietekme uz augsnes auglības saglabāšanu, kaitīgo organismu attīstību un izplatību, ražu un tās kvalitāti bezmaiņas sējumos".
3) Latvijas Lauksaimniecības universitātes pētniecības programma "Zinātnes kapacitātes stiprināšana LLU". Projekts Nr. Z33 "Augsekas produktivitāte atkarībā no ziemas kviešu īpatsvara tajā un augsnes apstrādes paņēmiena".
4) ESF projekts ES32 – "LLU pāreja uz jauno doktorantūras finansēšanas modeli".

Promocijas darba aprobācija

Par pētījuma rezultātiem sagatavotas četras publikācijas, kuras indeksētas Scopus un / vai Web of Science datu bāzēs, deviņas publikācijas citos semināru un konferenču rakstu un tēžu krājumos. Sniegti pieci mutiskie un seši stenda ziņojumi konferencēs un zinātniskajos semināros.

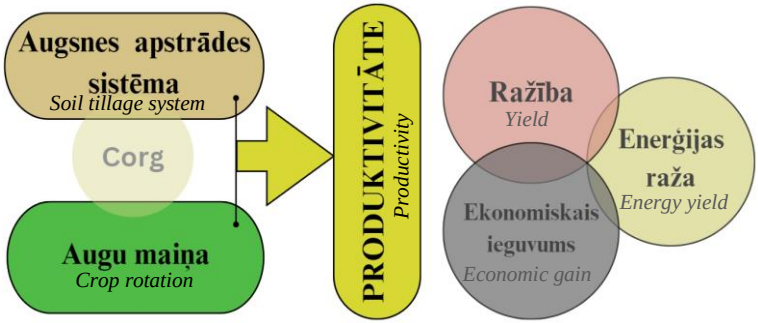
Nozīmīgākās publikācijas, kuras indeksētas Scopus un / vai Web of Science datu bāzēs

1. Darguza[1] M. Gaile Z. (2023). Productivity of crop rotation depending on included plants and soil tillage. *Agriculture*. 13, Article No. 1751. DOI:103390/Agriculture13091751.
2. Darguza[1] M., Gaile Z. (2020). The Effect of Crop Rotation and Soil Tillage on Winter Wheat Yield. ***In****: "Research for Rural Development 2020",* Annual 26th International Scientific Conference Proceedings (13–15 May, 2020), Vol. 35. Jelgava: LLU, p. 14–21. DOI: 10.22616/rrd.26.2020.002.
3. Darguza[1] M., Gaile Z. (2019). Yield and Quality of Winter Wheat, Depending on Crop Rotation and Soil Tillage. ***In****: "Research for Rural Development 2019",* Annual 25th International Scientific Conference Proceedings (15–17 May, 2019). Jelgava: LLU, Vol. 2, p. 29–35. DOI: 10.22616/rrd.25.2019.045.
4. Darguža[1] M., Gaile Z. (2018). Productivity of crop rotation measured as energy produced by included plants: a review. ***In****: "Research for Rural Development 2018"* Annual 24th International Scientific Conference Proceedings (16–18 May, 2018). Jelgava: LLU, Vol. 2, p. 20–27. DOI: 10.22616/rrd.24.2018.046.

[1] Mainīts uzvārds no Darguža uz Misule

PĒTĪJUMA APSTĀKĻI UN METODIKA

Pētījumā kultūraugu produktivitāte vērtēta atkarībā no augu maiņas un augsnes apstrādes sistēmas. Augu maiņā ietverto sugu ražības salīdzinājums tonnās (t ha^{-1}) nav pietiekami objektīvs, tāpēc salīdzināšanai tika izmantota biomasā akumulētā enerģijas raža (GJ ha^{-1}) un bruto peļņa (EUR ha^{-1}). Pētījumā tika salīdzinātas augsnes organiskā oglekļa (C_{org}) satura un daudzuma izmaiņas atkarībā no augsnes apstrādes sistēmas un augu maiņas (1. att.).



1. att. **Promocijas darbā pētīto faktoru un iegūto rezultātu shematisks attēlojums /**
Fig. 1. Schematic representation of the factors studied and the obtained results in the thesis

Pētījuma vietas raksturojums

Lauka izmēģinājumi iekārtoti LLU LF (tagad LBTU LPTF) MPS "Pēterlauki" pētījumu vietā "Poķi" (56° 30.658′ Z un 23° 41.580′ A) divfaktoru izmēģinājuma stacionārā ar divām augsnes apstrādes sistēmām un trīs dažādiem augu maiņas variantiem. Stacionārs iekārtots 2009. gadā, tā kopējā platība ir 6 ha. Pētījums promocijas darba ietvaros veikts četru veģetācijas sezonu garumā no 2016./2017. gada līdz 2019./2020. gadam, lai aptvertu pilnu visu augu maiņu ciklu. Pētījumā izmantoti augsnes analīžu dati no 2010.[2], 2017. un 2022. gada; 2010. gada dati izmantoti sākotnējā stāvokļa salīdzināšanai ar 2017. un 2022. gada rezultātiem.

[2] Dati no projekta VPP-5.3.1. (Nr.VP26) "Vietējo lauksaimniecības resursu ilgtspējīga izmantošana paaugstinātas uzturvērtības pārtikas produktu izstrādei" (PĀRTIKA) 3.1. apakšprojekts "Augsnes kā galvenā resursa ilgtspējīga izmantošana drošu un kvalitatīvu pārtikas un lopbarības izejvielu ieguvei no plašāk audzētajām laukaugu sugām"

Izmēģinājums ierīkots virsēji velēnglejotā augsnē, granulometriskais sastāvs – putekļu māls. Atbilstoši starptautiskajai augšņu klasifikācijai augsne ir *Cambic Calcisol*. Augsnes agroķīmiskās analīzes (0–20 cm slānī) veiktas 2017. gadā: augsnes reakcija pH_{KCl} 6.7, organisko vielu saturs augsts – 3.5%, augiem izmantojamā fosfora (P_2O_5) nodrošinājums vidējs – 125.9 mg kg^{-1}, kālija (K_2O) – augsts – 233.0 mg kg^{-1}.

Pētāmo variantu apraksts

Promocijas darba pētījumā ietverti šādi faktori:

A – augsnes apstrādes sistēma;

B – augu maiņa;

C – veģetācijas sezona (pētījuma gada agrometeoroloģiskie apstākļi)

Augsnes apstrādes sistēmas

A1: tradicionālā augsnes apstrāde, kura ietvēra augsnes pamatapstrādi – aršanu ar velēnas apvēršanu 22–24 cm dziļumā un aruma šļūkšanu, kā arī augsnes pirmssējas apstrādi ar kompaktoru 4–5 cm dziļumā (turpmāk – TA);

A2: reducētā augsnes apstrāde, kurā augsnes pamatapstrāde bija lobīšana ar disku lobītāju 8–10 cm dziļumā divas reizes un pirmssējas apstrāde ar kompaktoru 4–5 cm dziļumā (turpmāk – RA).

Augsnes pamatapstrāde visiem kultūraugiem veikta rudenī.

Augu maiņas varianti savstarpēji atšķīrās ar iekļauto kultūraugu skaitu, augu maiņas garumu un ziemas kviešu (*Triticum aestivum*) īpatsvaru tajās. Katra augu maiņa tika īstenota abos pētītajos augsnes apstrādes variantos.

B1: ziemas kviešu bezmaiņas sējumi ar 100% kviešu īpatsvaru no 2009. gada (2014. gada pavasarī nepārziemojušie ziemāji tika pārsēti ar vasaras kviešiem) (turpmāk – 100% kvieši).

B2: augu maiņas garums bija trīs gadi, un kviešu īpatsvars tajā – 67%, vienu reizi trīs gados augu maiņā iekļaujot ziemas rapsi (*Brassica napus* ssp. *oleifera*). Kultūraugu secība: rapsis – kvieši – kvieši. Izmēģinājuma stacionārā katru gadu tika pētīti divi no trīs rotācijā iekļautajiem kultūraugiem, audzējot tos augu maiņā paredzētajā augu secībā (turpmāk arī 67% kvieši). Šajā augu maiņā vienu gadu kviešu priekšaugs bija rapsis, bet nākamajā gadā kvieši tika sēti atkārtoti pēc kviešiem un tad atkal sekoja rapsis.

B3: augu maiņa četru gadu garumā ar iekļautiem četriem dažādiem kultūraugiem šādā secībā: lauka pupas (*Vicia faba*) – ziemas kvieši – ziemas rapsis – vasaras mieži (*Hordeum vulgare*). Ziemas kviešu īpatsvars šajā augu maiņā bija 25% (turpmāk arī 25% kvieši). Katru gadu tika pētīti trīs no četriem rotācijā iekļautajiem kultūraugiem, audzējot tos augu maiņā paredzētajā augu secībā.

Izmēģinājums promocijas darba izstrādei uzsākts 2016. gada rudenī izmēģinājumu stacionārā, kurā iekārtoti 12 varianti četros atkārtojumos. Izmēģinājums iekārtots divos lauka blokos (stacionāra plānu skat. 2. att.), katrā blokā 12 lauki (kopā 24), un katrs izmēģinājuma lauks sadalīts uz pusēm (I un II), lai iegūtu četrus atkārtojumus. Viena lauka izmērs blokā ir 0.25 ha (100 m × 25 m), sadalot to uz pusēm ieguva lauciņus 0.125 ha izmērā.

Ražas novākšanas gads / *Harvest year*	**1. sleja / *1st column***	**2. sleja / *2nd column***	**3. sleja / *3rd column***	**4. sleja / *4th column***
	RA / *RT*	**TA / *CT***	**TA / *CT***	**RA / *RT***
	Nr. 1 / *No. 1*	**Nr. 2 / *No. 2***	**Nr. 3 / *No. 3***	**Nr. 4 / *No. 4***
2016	kvieši	kvieši	rapsis	rapsis
2017	**kvieši**	**kvieši**	**kvieši**	**kvieši**
2018	**kvieši**	**kvieši**	**kvieši**	**kvieši**
2019	**kvieši**	**kvieši**	**rapsis**	**rapsis**
2020	**kvieši**	**kvieši**	**kvieši**	**kvieši**
	Nr. 5 / *No. 5*	**Nr. 6 / *No. 6***	**Nr. 7 / *No. 7***	**Nr. 8 / *No. 8***
2016	kvieši	kvieši	pupas	pupas
2017	**rapsis**	**rapsis**	**kvieši**	**kvieši**
2018	**kvieši**	**kvieši**	**rapsis**	**rapsis**
2019	**kvieši**	**kvieši**	**mieži**	**mieži**
2020	**rapsis**	**rapsis**	**pupas**	**pupas**
	Nr. 9 / *No. 9*	**Nr. 10 / *No. 10***	**Nr. 11 / *No. 11***	**Nr. 12 / *No. 12***
2016	z. rapsis	rapsis	kvieši	kvieši
2017	**mieži**	**mieži**	**rapsis**	**rapsis**
2018	**pupas**	**pupas**	**mieži**	**mieži**
2019	**kvieši**	**kvieši**	**pupas**	**pupas**
2020	**rapsis**	**rapsis**	**kvieši**	**kvieši**

2. att. **Izmēģinājumu stacionāra 1. bloka plāns izmēģinājuma gados**

Fig. 2. Plan of the 1st block of the experimental stationary

Notes: kvieši – ziemas kvieši / *winter wheat;* rapsis – ziemas rapsis / *winter oilseed rape;* mieži – vasaras mieži / *spring barley*; pupas / *spring field beans*; RA / *RT* – reducētā augsnes apstrāde / *reduced soil tillage*; TA / *CT* – tradicionālā augsnes apstrāde / *conventional soil tillage*; Nr. 1 / *No. 1* ...Nr. 12 / *No. 12* – lauka numurs / *plot number*;

kultūraugu secība promocijas darba pētījuma gados / crop rotation sequence during the research years

Veģetācijas sezona: izmēģinājums veikts četras sezonas: C1 – 2016./2017. g., C2 – 2017./2018. g., C3 – 2018./2019. g. un C4 – 2019.2020. g. veģetācijas sezonās.

Agrotehnika izmēģinājumā

Priekšaugs un augsnes apstrādes sistēma pētījumā iekļautajiem kultūraugiem tika piemēroti atbilstoši izmēģinājuma shēmai un kultūraugu izvietojuma plānam 2016.–2020. gadā (skat. 2. att.).

Ziemas kvieši. Augsnes apstrāde veikta augustā vai septembrī. Visos ziemas kviešu laukos augsnes apstrāde katrā gadā veikta atšķirīgos datumos, bet gada ietvaros vienā dienā visiem laukiem. Apstrādes laiks bija atkarīgs no vēlākā ziemas kviešu priekšauga ražas novākšanas laika. Abas augsnes apstrādes sistēmas iekļāva lauka pirmssējas apstrādi ar kompaktoru 4–5 cm dziļumā.

Priekšaugi – ziemas kviešu priekšaugi bija atšķirīgi pa pētāmajiem variantiem: ziemas kvieši, rapsis vai lauka pupas.

Sējas laiks. Ziemas kviešu sēja izmēģinājuma periodā veikta septembrī: 19.09.2016.; 30.09.2017., 06.09.2018., 10.09.2019. Izsējas norma tika izvēlēta 500 dīgtspējīgas sēklas m^{-2}, izņēmums bija 2018. gadā – 450 dīgtspējīgas sēklas m^{-2}, jo sējas termiņš bija agrāks. Šķirne – pētījuma pirmajā gadā izmantota šķirne ‘Zentos’, kuru sēja kopš stacionārā izmēģinājuma uzsākšanas, bet turpmākajos gados tā aizstāta ar aktuālāku ziemas kviešu šķirni ‘Skagen’. Abas šķirnes ir augstražīgas, tās var nodrošināt augstākās klases pārtikas graudus.

Pamatmēslojums iestrādāts augsnē reizē ar sēju, nodrošinot slāpekli (N) 25 kg ha^{-1}, fosforu (P_2O_5) – 65 kg ha^{-1}, kāliju (K_2O) – 65 kg ha^{-1}. Papildmēslojumā pavasarī pirmā lietošanas reize bija neilgi pēc veģetācijas atjaunošanās (30.03.2017.; 16.04.2018.; 29.03.2019.; 4.03.2020.), nodrošinot 86 kg ha^{-1} slāpekļa, bet otrā papildmēslošanas reize bija stiebrošanas sākumā (31.–32. AE), lietojot amonija nitrātu un 2017. gadā nodrošinot N 86 kg ha^{-1}, pārējos pētījuma gados – N 68.8 kg ha^{-1}. Kopā papildmēslojumā tika nodrošināti 155–172 kg ha^{-1} slāpekļa. Atkarībā no katra gada iespējām, lietoti arī ārpussakņu mēslojumi tvertnes maisījumos ar augu aizsardzības līdzekļiem.

Kaitīgo organismu ierobežošana un izmantotie augu aizsardzības līdzekļi starp pētījuma gadiem atšķīrās, un tie tika izvēlēti atbilstoši nepieciešamībai. Nezāļu ierobežošanu ziemas kviešu sējumos veica pavasarī, kviešu stiebrošanas fāzes sākumā. Slimību ierobežošana notika vienu reizi veģetācijas periodā, ziemas kviešu vārpošanas fāzē (51.–55. AE), lai ierobežotu ziemas kviešu lapu slimības. Kaitēkļu ierobežošana bija nepieciešama tikai vienā no pētījuma gadiem – 2018. gadā (55. AE), kad bija ļoti silta vasara un labvēlīgi apstākļi, lai kaitēkļi savairotos.

Augu augšanas regulators izmēģinājumā ziemas kviešiem visos pētījuma gados lietots divas reizes stiebrošanas laikā. Pirmā lietošanas reize bija pirms 31. AE, otrā augu augšanas regulatora lietošanas reize bija– 37. AE.

Ziemas rapsis tika audzēts divos no pētītajiem augu maiņas variantiem, kur tas tika sēts reizi trīs gados "67% kvieši" (B2: R-K-K) vai reizi četros gados "25% kvieši" (B3: P-K-R-M). Ziemas rapsis augu maiņā "67% kvieši" tika sēts trīs no četriem pētījuma gadiem, bet augu maiņā "25% kvieši" – divos gados.

Ziemas rapša priekšaugs visos izmēģinājuma variantos bija ziemas kvieši. Augsnes apstrāde veikta pēc priekšauga ražas novākšanas, izmantojot aršanu A1 variantā un augsnes lobīšanu A2 variantā. Izmantotie augsnes apstrādes veidi aprakstīti 8. lpp.

Sēja. Ziemas rapsis pētījuma gados sēts optimālā termiņa beigās (18.08.2017.; 18.08.2018.; 19.08.2019.) vai novēloti (28.08.2016.). Izsējas norma bija 80 dīgtspējīgas sēklas 1 m^2, audzējot hibrīdā rapša šķirnes. Izsējas norma bija nedaudz palielināta virs ieteicamās, paredzot zemāku laukdīdzību putekļu māla augsnē. Pētījumā tika sētas ziemas rapša hibrīdās šķirnes, kuras starp pētījuma gadiem atšķīrās, bet katrā no pētījuma gadiem sētajos variantos bija vienādas. Šķirne 'Veritas CL' sēta 2016./2017. gadā, bet 2017./2018. gadā, ņemot vērā iepriekšējā gada vēlo sējas laiku, tika izlemts sēt šķirni 'Visby', kura raksturojas ar labu attīstību rudenī arī tad, ja sēta vēlākā sējas termiņā. Šo šķirni izmantoja arī 2018./2019. gadā. Ceturtajā izmēģinājuma gadā šķirne nomainīta uz 'KWS Hymalaya CL', jo bija nepieciešams ierobežot krustziežu nezāles un sārņaugus.

Pamatmēslojums iestrādāts augsnē reizē ar sēju, lietojot komplekso mēslošanas līdzekli NPK, nodrošinot 2016. gadā N 17.5 kg ha^{-1}, P_2O_5 50 kg ha^{-1} un K_2O 70 kg ha^{-1}; 2017. un 2018. gadā – N 23 kg ha^{-1}, 59.8 kg ha^{-1} P_2O_5 un K_2O; 2019. gadā – N 25 kg ha^{-1}, 65 kg ha^{-1} P_2O_5 un K_2O. Papildmēslojumā pavasarī, ziemas rapša veģetācijai atjaunojoties, visos izmēģinājuma gados lietots N 86 kg ha^{-1}. Otrā papildmēslošanas reize bija 3–5 nedēļas pēc pirmās mēslošanas reizes, stublāja pagarināšanās laikā, pirms ziedēšanas. Papildmēslojums 2017.–2019. gadā lietots divas reizes, otrajā reizē izmantojot amonija nitrātu, ar devu 250 kg ha^{-1} (N 86 kg ha^{-1}) 2017. gadā, bet 200 kg ha^{-1} (N 69 kg ha^{-1}) 2018. un 2019. gadā. Augstākais ražas potenciāls bija 2020. gadā, tāpēc tika lietoti trīs pavasara slāpekļa papildmēslojumi. Otrajā papildmēslojumā divas nedēļas pēc pirmās mēslošanas reizes lietots amonija sulfāts, deva 200 kg ha^{-1} (N 42 kg ha^{-1}, S 48 kg ha^{-1}) un pēc divām nedēļām ražas potenciāla attīstīšanai lietots amonija nitrāts, deva 200 kg ha^{-1} (N 69 kg ha^{-1}), kopā nodrošinot 197 kg ha^{-1} slāpekļa un 48 kg ha^{-1} sēra. Atkarībā no katra gada iespējām, lietoti arī ārpussakņu mēslojumi tvertnes maisījumos ar augu aizsardzības līdzekļiem, pētījuma laikā ikgadēji tie atšķīrās, bet visos izmēģinājuma variantos, lietojot konkrētajā gadā, mēslošana bija vienāda.

Kaitīgo organismu ierobežošana rapsim. Nezāļu ierobežošana. Pirmajā (2016./2017.) un ceturtajā (2019./2020.) pētījuma sezonā lietots Clearfield tehnoloģijai piemērots herbicīds un papildus pavasarī lietots arī viendīgļlapju nezāles un sārņaugus ierobežojošs herbicīds; 2017./2018. gadā pēc sējas izmantots augsnes un pieskares iedarbības herbicīds, bet 2018./2019. gadā pēc ziemas rapša sējas lietots augsnes iedarbības herbicīds dīgstošo viendīgļlapju un

divdīgļlapju nezāļu ierobežošanai, papildus pavasarī lietots arī viendīgļlapjus ierobežojošs herbicīds. Slimību ierobežošanai fungicīdi netika lietoti. Kaitēkļu ierobežošana notika vismaz vienu reizi katrā sezonā, izņemot 2020. gada pavasari / vasaru, kad bija nepieciešami trīs insekticīda smidzinājumi, jo siltais un mitrais pavasaris veicināja ilgstošu ziedēšanu un kaitēkļu skaita palielināšanos.

Augu augšanas regulators izmēģinājumā ziemas rapsim lietots 2016., 2017., un 2018. gada rudenī vienu reizi.

Vasaras mieži pētījuma laikā tika sēti trīs no četrām sezonām 2017., 2018. un 2019. gadā, atbilstoši augu maiņas plānam stacionārā (skat. 2. att.).

Priekšaugs vasaras miežiem augu maiņā "25% kvieši" bija ziemas rapsis.

Augsnes apstrāde veikta rudenī pēc priekšauga ražas novākšanas, izmantojot aršanu A1 variantā un augsnes lobīšanu A2 variantā.

Sēja vasaras miežiem pētījuma gados veikta optimālos termiņos (24.04.2017.; 29.04.2018.; 17.04.2019.), izmantoja šķirni 'Tocada' ar izsējas normu 450 dīgtspējīgas sēklas 1 m^2.

Pamatmēslojums izkliedēts pirms sējas un iestrādāts augsnē reizē ar sēju, lietojot komplekso mēslošanas līdzekli un nodrošinot 38 kg ha^{-1} slāpekļa un tādu pašu daudzumu P_2O_5 un K_2O. Cerošanas sākumā (21. AE) lietots papildmēslojums, nodrošinot papildus 61.9 kg ha^{-1} slāpekļa 2017. gadā, 68.8 kg ha^{-1} – 2018. gadā, 54 kg ha^{-1} – 2019. gadā. Kopā nodrošinātais slāpekļa mēslojums miežiem bija: 2017. gadā – 99 kg ha^{-1}, 2018. gadā – 107 kg ha^{-1}, 2019. gadā – 92 kg ha^{-1}.

Kaitīgo organismu ierobežošana. Nezāļu ierobežošana vasaras miežu sējumos notika atbilstoši nezāļu botāniskajam sastāvam un to skaitam, lietojot herbicīdu pavasarī. Slimību ierobežošana bija nepieciešama 2017. un 2019. gadā, kad izmantots viens fungicīda smidzinājums. Kaitēkļu ierobežošanai insekticīds lietots tikai 2019. gadā.

Lauka pupas pētījuma laikā tika sētas trīs no četrām sezonām 2018., 2019. un 2020. gadā, atbilstoši augu maiņas plānam stacionārā (skat. 2. att.). Priekšaugs lauka pupām augu maiņā "25% kvieši" bija vasaras mieži.

Augsnes apstrāde veikta pēc priekšauga ražas novākšanas, izmantojot aršanu A1 variantā un augsnes lobīšanu A2 variantā.

Sēja lauka pupām pētījuma gados veikta atkarībā no iespējamības apstrādāt augsni pavasarī: 24.04.2018., 06.04.2019., 30.03.2020. Visos izmēģinājuma gados sēja šķirni 'Laura' ar izsējas normu 45 dīgtspējīgas sēklas 1 m^2.

Pamatmēslojums iestrādāts augsnē reizē ar sēju, lietojot kompleksos mēslošanas līdzekļus: 2018. gadā nodrošinot N –14.4 kg ha^{-1}, P_2O_5 – 62 kg ha^{-1}; 2019. gadā un 2020. gadā nodrošinot N – 30, P_2O_5 – 30, K_2O – 30 kg ha^{1}.

Kaitīgo organismu ierobežošana. Nezāļu ierobežošanai pēc sējas lietots selektīvs, sistēmas iedarbības herbicīds. Stublāja pagarināšanās laikā neilgi pirms ziedēšanas visos izmēģinājuma gados lietots herbicīds viendīgļlapju

nezāļu un labību sārņaugu ierobežošanai. Slimību ierobežošanai fungicīdi netika lietoti. Kaitēkļu ierobežošana notika vienu reizi katrā sezonā lauka pupu ziedēšanas sākumā.

Izmēģinājumā veiktie novērojumi un analīzes

Dīgšanas dinamika ziemas kviešiem uzskaitīta trijos no četriem pētījuma gadiem: 2017., 2018.un 2019. gadā. Dīgšanas dinamikas uzskaite sākta no pirmo dīgstu parādīšanās brīža un turpināta ik pēc 2 līdz 3 dienām pirmajā nedēļā un turpināta līdz dīgstu skaits ir nemainīgs vai sākās cerošana. Uzskaites reižu skaits pētījuma gados bija mainīgs, jo atšķīrās sadīgšanas ātrums un vienmērīgums pa gadiem un augsnes apstrādes variantiem atkarībā no meteoroloģiskajiem apstākļiem dīgšanas laikā. Uzskaite veikta, izmantojot 0.1 m^2 rāmīti, veicot trīs mērījumus katrā lauciņā. Pirmajā uzskaites reizē randomizēti izvēlētās uzskaites vietas tika precīzi atzīmētas ar mietiņiem, un tās bija nemainīgas visu uzskaites laiku katrā gadā.

Katrā pētījuma gadā salīdzināta dīgšanas dinamika abās pētītajās augsnes apstrādes sistēmās piecās kopīgajās uzskaites reizēs un beidzamajā uzskaites reizē, aprēķinot pieaugumu (%).

Ziemas kviešu laukdīdzība (%) tika aprēķināta pēc (1) formulas, ņemot aprēķinam sadīgušo dīgstu datus no beidzamās dīgšanas dinamikas uzskaites.

$$\text{Laukdīdzība / } \textit{Field germination, \%} = \frac{\text{SA}}{\text{IN}} \times 100 \qquad (1)$$

kur / *where:*
SA – dīgstu skaits, gab. m^{-2} / *sprouts, pieces* m^{-2}
IN – izsējas norma, dīgtspējīgo sēklu skaits m^{-2} / *sowing rate, germinable seeds* m^{-2}

Pētījuma laikā novēroja izmēģinājumā iekļauto **kultūraugu augšanu un attīstību**, reģistrējot attīstības etapus (AE) pēc BBCH skalas. Ziemas kviešiem noteikts **veģetācijas perioda garums,** rēķinot dienās no 1. janvāra līdz 89. AE. Noteikta ziemas kviešu **ziemcietība** un **izturība pret veldri**, abi rādītāji vērtēti 9 ballu skalā[3].

Ražu veidojošo struktūrelementu noteikšana, izmantojot paraugkūļus. Paraugkūļu ievākšana ziemas kviešiem, vasaras miežiem, lauka pupām un ziemas rapsim notika 89. AE. Ziemas kviešu un vasaras miežu paraugkūļi ievākti no 0.125 m^2 laukuma trīs vietās katrā lauciņā. Ziemas rapsim un lauka pupām

[3] *Augu šķirnes saimniecisko īpašību novērtēšanas noteikumi.* Ministru kabineta noteikumi Nr.518. [Tiešsaiste] [skatīts 01.02.2023.]. Pieejams: https://likumi.lv/ta/id/250577-augu-skirnes-saimniecisko-ipasibu-novertesanas-noteikumi.

paraugkūļi ievākti 0.5 m^2 platībā divās vietās katrā lauciņā. No paraugkūļiem noteikti ražas struktūrelementi:

- ziemas kviešiem un vasaras miežiem – produktīvo stiebru skaits m^{-2}, graudu skaits vārpā;
- ziemas rapsim – augu skaits m^{-2};
- lauka pupām – augu skaits m^{-2}, pākšu skaits augam, gab., sēklu skaits pākstī, gab.

Ražas struktūrelements 1000 graudu / sēklu masa noteikta ar standartmetodi (LVS EN ISO 520:2011).

Graudu / sēklu raža ziemas kviešiem, miežiem un lauka pupām iegūta ar tiešo ražas uzskaites metodi, nokuļot lauciņa ražu, to nosverot un tad tā pārrēķināta pie 100% tīrības un standartmitruma (14%). Nokultā lauciņa uzskaites platība pa gadiem svārstījās un bija vidēji no 100–120 m^2. Ziemas rapsim ražas uzskaite veikta ar netiešo ražas uzskaites metodi, izmantojot ievāktos paraugkūļus un no tiem iegūto vidējo sēklu masu pārrēķinot t ha^{-1} pie 100% tīrības un 8% mitruma.

Salmu raža aprēķināta, izmantojot graudu/sēklu ražu un paraugkūļu analīzē iegūto graudu / sēklu un salmu attiecību, pārrēķinot pie graudu / sēklu standartmitruma ((2) formula).

$$\text{Salmu raža, t ha}^{-1}\text{ / } \textit{Straw yield t ha}^{-1} = \frac{\text{salmu masa paraugkūlī, g / } \textit{straw mass in sample sheaf, g}}{\text{graudu masa paraugkūlī, g / } \textit{grain weight in sample sheaf, g}} \times \text{graudu raža, t ha}^{-1}\text{ / } \textit{grain yield, t ha}^{-1} \quad (2)$$

Aprēķināts ražas indekss, kurš izsaka graudu / sēklu masas īpatsvaru kopējā virszemes biomasas ražā.

Graudu un sēklu kvalitātes rādītāji noteikti LLU LF (tagad LBTU LPTF) Graudu un sēklu mācību-zinātniskajā laboratorijā. Izmantojot tuvo infrasarkano staru spektroskopiju (NIRS) ar analizatoriem Infratec Analyzer 1241 (2017. gadā) un Infratec™ NOVA (no 2018. gada), noteiktie kvalitātes rādītāji pētītajiem laukaugiem apkopoti 1. tabulā. Analizatori pievienoti Latvijas graudu tīklam.

1. tabula / *Table 1*

Ar tuvo infrasarkano staru spektroskopiju noteiktie kvalitātes rādītāji pētītajiem kultūraugiem

The quality indices of the studied crops determined by the near-infrared spectroscopy

Kvalitātes rādītājs / *Quality indicator*	Kultūraugs /*Crop*
Proteīna saturs, % / *Protein content, %*	kvieši, mieži, pupas / *wheat, barley, field beans*
Lipekļa saturs, % / *Gluten content, %*	kvieši / *wheat*
Zeleny indekss / *Zeleny index*	kvieši / *wheat*
Tilpummasa, kg hL^{-1} / *Volume weight, kg hL^{-1}*	kvieši, mieži, rapsis / *wheat, barley, oilseed rape*
Eļļas saturs, % / *Oil content, %*	rapsis / *oilseed rape*
Cietes saturs, % / *Starch content, %*	kvieši, mieži / *wheat, barley*

Ziemas kviešiem krišanas skaitlis (s) noteikts pēc Hagberga-Pertena metodes (ISO 3093:2009). Lauka pupām tilpummasa noteikta pēc standartmetodes LVS 273, izmantojot cilindrus un svarus. Iegūto graudu un sēklu kvalitātes atbilstība iepirkumam salīdzināta ar Lauksaimniecības pakalpojumu kooperatīvās sabiedrības "Latraps" (turpmāk – LPKS "Latraps") kvalitātes prasībām. Ziemas kviešu graudu atbilstībai kādai no kvalitātes grupām (pārtikas vai lopbarības) vērtēts proteīna un lipekļa saturs, tilpummasa un krišanas skaitlis, atsevišķi netika salīdzināts mitrums un piemaisījumu daudzums, jo kvalitāte vērtēta 100% tīrai ražai pie 14% mitruma. Lauka pupām piemērota lopbarības grupa, jo nepieciešamie kvalitātes novērtējumi, lai pupas iekļautu pārtikas grupā, izmēģinājuma laikā netika veikti (kaitēkļu bojāto sēklu īpatsvars un šķelto sēklu īpatsvars). Vasaras miežiem iepirkumā vērtēta tilpummasa un tai bija jābūt virs 60 kg hL^{-1}. Rapša sēklu iepirkumā minēts bāzes eļļas saturs – 40%.

Kultūraugu enerģijas raža. Izmēģinājumā iekļauto kultūraugu sēklu un pēcpļaujas atlieku enerģētiskās vērtības (kJ kg^{-1}) noteiktas Latvijas Valsts Koksnes ķīmijas institūtā ar standartmetodi (EN ISO 18125:2017). Enerģētiskā vērtība noteikta katra varianta vidējam paraugam no četriem atkārtojumiem. Kultūraugu enerģijas raža (kJ ha^{-1}, tad pārrēķināta GJ ha^{-1}) aprēķināta pēc (3) formulas, atsevišķi rēķinot enerģijas ražu no graudiem / sēklam un ražas pēcpļaujas atliekām.

$$R_{en} = (R_{bs} \times E_v) / 10^6 \qquad (3)$$

kur / *where*:

R_{en} – graudu / sēklu / pēcpļaujas atlieku enerģijas raža, GJ ha^{-1} / *grain/seed/post-harvest residual energy yield, GJ ha^{-1}*

R_{bs} – biomasas sausnas raža graudiem / sēklām / pēcpļaujas atliekām; t ha^{-1} / *biomass dry matter yield for grain/seed/post-harvest residues; t ha^{-1}*

E_v – graudu / sēklu / pēcpļaujas atlieku enerģētiskā vērtība; kJ kg^{-1} / *energy value of grain/seed/post-harvest residues; kJ kg^{-1}*

Lai noteiktu kopējo enerģijas ražu no 1 ha, summēta pamatprodukcijas enerģijas raža un no ražas pēcpļaujas atliekām iegūstamais enerģijas daudzums (kJ ha^{-1} vai GJ ha^{-1}). Lai savstarpēji salīdzinātu izmēģinājumā iekļautos augu maiņu variantus, tika aprēķinātas vidējās iegūtās enerģijas ražas no katra kultūrauga katrā augu maiņā atsevišķi (piem., vidējā enerģijas raža no kviešiem augu maiņā "100% kvieši" un vidējā kviešu enerģijas raža augu maiņā "67% kvieši" un analoģiski arī augu maiņā "25% kvieši"). Vidējā enerģijas raža reizināta ar kultūrauga proporciju augu maiņas variantā un noteikts proporcionālais enerģijas sadalījums no katra kultūrauga augu maiņā.

Organiskais ogleklis (C_{org}) aprēķināts no organisko vielu (%) satura augsnē, izmantojot "*Van Bemmelen* faktoru" – pārrēķina koeficientu 1.724 ((4) formula).

$$\text{Organiskais ogleklis, \%} \;\; \textit{Organics carbon, \%} = \frac{\text{Organiskās vielas, \%} \;/\; \textit{Organic matter, \%}}{1.724} \qquad (4)$$

Organisko vielu saturs augsnē noteikts Valsts augu aizsardzības dienesta Agroķīmijas laboratorijā 2010., 2017. un 2022. gadā. Izmantota LR Zemkopības Ministrijas 2022. gada 4. janvāra kārtības Nr. 1 "Augšņu agroķīmiskās izpētes un izpētes rezultātu novērtēšanas kārtība", kura ir ekvivalenta 2010. un 2017. gadā izmantotajām metodēm. Veikta mitrā pārpelnošana, izmantojot kālija bihromāta ($K_2Cr_2O_7$) un sērskābes (H_2SO_4) maisījumu 125 °C temperatūrā. Analizēšanai nodoti paraugi no trīs dažādiem augsnes slāņiem: 0–20 cm, 20–40 cm un 40–60 cm. Paraugi ievākti katrā izmēģinājuma laukā, veicot zondēšanu vismaz trīs dažādās vietās laukā katrā no izmēģinājuma blokiem. Kopā – 24 vidējie paraugi katrā analizētajā augsnes dziļumā.

Augsnes analīžu dati C_{org} satura salīdzināšanai pētījumu periodā ar sākotnējiem, 2010. gada rezultātiem, iegūti agrāk veikta projekta ietvaros: VPP-5.3.1. (Nr.VP26) "Vietējo lauksaimniecības resursu ilgtspējīga izmantošana paaugstinātas uzturvērtības pārtikas produktu izstrādei" (PĀRTIKA) 3.1. apakšprojekts "Augsnes kā galvenā resursa ilgtspējīga izmantošana drošu un kvalitatīvu pārtikas un lopbarības izejvielu ieguvei no plašāk audzētajām laukaugu sugām". Projekta īstenošanas laiks 2010.–2013. gads, vadītājs A. Ruža.

C_{org} krājumu (t ha^{-1}) aprēķināšanai augsnē 0–20 cm dziļumā izmantots aprēķinātais C_{org} saturs (%) un vidējā augsnes tilpummasa (t m^{-3}) augsnes apstrādes sistēmu variantos, kura noteikta 2017. gadā veiktajās augsnes analīzēs (iegūtie dati publicēti ZM subsidētā projekta Nr. 310 "Minimālās augsnes apstrādes ietekme uz augsnes auglības saglabāšanu, kaitīgo organismu attīstību un izplatību, ražu un tās kvalitāti bezmaiņas sējumos" atskaites pielikumos[4]). C_{org} daudzums 0–20 cm dziļumā aprēķināts pēc (5) formulas.

[4] *Augsnes tilpummasa.* LBTU. [Tiešsaiste] [skatīts 26.05.2023.]. Pieejams: https://www.lbtu.lv/sites/default/files/files/projects/S310_atskaite.pdf.

$$C_{org}\,krājumi = TM \times DZ_a \times 10^4 \times \frac{C_{org}sat}{100} \quad (5)$$

kur: C_{org} krājumi – organiskā oglekļa krājumi augsnē 0–20 cm dziļumā, t ha^{-1} / *soil organic carbon stocks at soil depth 0–20 cm*; *t* ha^{-1};

TM – augsnes tilpummasa, t m^{-3}; *soil bulk density, t* m^{-3};

DZa – augsnes dziļums, kurā aprēķināti C_{org} krājumi, m / *soil depth at which* C_{org} *stocks are calculated, m;*

C_{org}sat – organiskā oglekļa saturs augsnē, %; *soil organic carbon content, %.*

Augkopības produkcijas ražošanas **ekonomiskais izdevīgums** atkarībā no augu maiņas un augsnes apstrādes variantiem novērtēts, izmantojot bruto seguma aprēķinu. Bruto segums aprēķināts atbilstoši "Latvijas Lauku konsultāciju un izglītības centra" (LLKC) izstrādātajai metodikai. Bruto segumu iegūst, no produkcijas realizācijas ieņēmumiem atskaitot mainīgās izmaksas izejvielām un mašīnu un roku darba operācijām. Bruto seguma aprēķināšanai izmantoti MPS "Pēterlauki" grāmatvedības uzskaites dokumenti (ienākošās un izejošās pavadzīmes) 2016., 2017., 2018., 2019. un 2020. gadā, LLKC apkopotie dati par augu aizsardzības un mēslošanas līdzekļu vidējām pārdošanas cenām valstī 2016., 2017., 2018., 2019. un 2020. gadā. Izmantoto materiālu cenu noskaidrošanai, kuras netika atrastas MPS "Pēterlauki" vai vidējās LLKC cenās, izmantotas arī izejmateriālu cenas, kuras pieejamas privātu saimniecību grāmatvedības uzskaites datos. Izejmateriālu cenas, kuras nebija iespējams noskaidrot, norādītas, kā analoģisku līdzekļu cenas. Mašīnu un roku darba operācijas rēķinātas, izmantojot LLKC apkopotās vidējās traktortehnikas pakalpojumu cenas Zemgales reģionā 2016., 2017., 2018., 2019. un 2020. gadā. Lauksaimniecības produkcijas realizācijas cenām izmantoti dati no LLKC sagatavotajiem Bruto segumiem par vidējām graudu / sēklu realizācijas cenām Latvijā ražas vākšanas gados. Ziemas kviešiem izmantotas cenas atbilstoši iegūtajai kvalitātes grupai: pārtikas vai lopbarības graudi atbilstoši LPKS "Latraps" iepirkuma prasībām 2022. gadā.

Aprēķināts katras augu maiņas vidējais ekonomiskais izdevīgums gadā, kurš izteiks kā bruto segums. Aprēķins veikts, ņemot vidējās bruto seguma vērtības katram kultūraugam vidēji gadā un ņemot vērā kultūrauga īpatsvaru augu maiņā (skat. (6) formulu). Augu maiņas vidējais ekonomiskais izdevīgums gadā rēķināts atsevišķi tradicionālajai un reducētajai augsnes apstrādes sistēmai.

Vidējais augu maiņas bruto segums gadā / *Average gross coverage of crop rotation per year*

$$= \frac{(K1 \times t) + (K2 \times t) + (Kn \times t)}{T} \quad (6)$$

kur / *where:*

K1, K2…Kn – augu maiņā iekļautā kultūrauga vidējais bruto segums (EUR ha^{-1}) visā periodā tradicionālajā vai reducētajā augsnes apstrādes sistēmā / *average gross coverage (EUR ha^{-1}) of the crop included in the crop rotation throughout the period in the conventional or reduced tillage system;*

t – ilgums gados, cik tas tiek audzēts vērtētajā augu maiņā / *the duration of the years in which it is grown in the rated crop rotation;*

T – kopējais augu maiņas garums (100% kvieši – 4 gadi, 67% kvieši – 3 gadi, 25% kvieši – 4 gadi) / *the total length of the crop rotation (100% wheat – 4 years, 67% wheat – 3 years, 25% wheat – 4 years)*

Datu matemātiskajai apstrādei izmantotas datorprogrammas MS Excel un RStudio, veicot dispersijas, korelācijas un regresijas analīzes. Rezultātu atšķirību būtiskums novērtēts 95% līmenī, izmantojot robežstarpības ($RS_{0.05}$) vērtību vai Bonferroni testu.

Meteoroloģisko apstākļu raksturojums

Meteoroloģiskie apstākļi izmēģinājumā vietā reģistrēti, izmantojot stacionāro, automātisko meteoroloģisko staciju Davis Wireless Vantage Pro2 Plus UV& SOLAR, kura atrodas izmēģinājuma vietā "Poķi". Izmēģinājuma periodā iegūtie meteoroloģiskie dati salīdzināti savstarpēji pa sezonām un ar ilggadīgajiem novērojumiem (tekstā arī 'norma'; vidējie pēdējo 30 gadu dati)) Jelgavas Hidrometeoroloģiskajā stacijā.

Vidējās **temperatūras** izmēģinājuma laikā krasi atšķīrās starp pētījuma sezonām. Trīs no izmēģinājuma gadiem raksturojās ar īpaši siltāku pavasara / vasaras veģetācijas periodu (izņemot 2016./2017. g.).

Nokrišņu daudzums izmēģinājuma periodā tika analizēts rudens veģetācijas periodā un turpinājās ar pavasara mēnešiem, jo ziemas mēnešos visos izmēģinājuma gados nebija iespējas noteikt izkritušo nokrišņu daudzumu, jo vairākās no ziemām augsni klāja sniegs, kuru automātiskā meteoroloģiskā stacija nereģistrē.

2016./2017. gads raksturojās ar mērenām gaisa temperatūrām un optimālu nokrišņu daudzumu augustā, bet samazinātu nokrišņu daudzumu rudens mēnešos. Ziema bija siltāka salīdzinājumā ar ilggadīgiem novērojumiem. Pavasaris un vasara raksturojās ar mērenu gaisa temperatūru, nokrišņu daudzums pavasarī un vasaras sākumā bija optimāls, bet jūlijā bija lielas lietavas, savukārt augusts un ražas novākšanas laiks bija ar zemu, mērenu nokrišņu daudzumu.

2017./2018. gadā septembris un oktobris bija ļoti lietaini, ar siltām gaisa temperatūrām, no ziemas mēnešiem bargākais bija februāris, bet vidējā temperatūra decembrī un janvārī bija augstāka par normu. Aprīlis bija nokrišņiem bagāts un ļoti silts, turpmākajos mēnešos līdz ražas novākšanai bija mitruma deficīts un novērotas paaugstinātas gaisa temperatūras maijā, jūlijā un augustā. Pavasara un vasaras periodā visa veģetācijas perioda garumā bija maz nokrišņu, kas bija tikai 64% no ilggadīgajiem novērojumiem pavasara mēnešos un 33% no normas vasaras mēnešos.

2018./2019. gads turpinājās ar izteiktu mitruma deficītu no 2018. g. oktobra mēneša līdz pat 2019. g. jūlija mēnesim. Jūlijā nolija salīdzinoši liels nokrišņu daudzums, kas tomēr bija tikai nedaudz augstāks par jūlijā ilggadīgi novēroto. Gaisa temperatūras bija mērenas līdz 2019. g. janvārim, pēc tam tās paaugstinājās un jūnijā tika novērots ekstremāls karstums, bet pārējos vasaras mēnešos temperatūras bija mērenas, lai gan nedaudz siltākas par normu.

2019./2020. gads no pārējiem atšķīrās ar siltākiem un nokrišņiem bagātiem rudens mēnešiem. Nokrišņu daudzums 2019. gada rudenī bija 2.4 reizes lielāks nekā ilggadīgi novērots. Ziemas periods bija ar paaugstinātu gaisa temperatūru, nevienā no mēnešiem vidējā temperatūra nenoslīdēja zem 0 ºC. Pavasarī un vasarā gaisa temperatūras bija mērenas, tomēr jūnijs bija karstāks par normu. Nokrišņu daudzums no aprīļa līdz jūnija vidum bija nepietiekams kultūraugu ražas veidošanai, tomēr jūnija beigas atnesa ekstremālu nokrišņu daudzumu, kura ietekmē ziemas kviešu lauki saveldrējās.

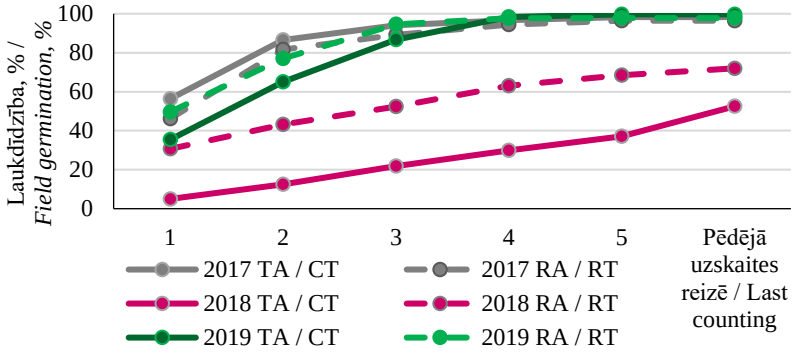
Meteoroloģisko apstākļu ietekme uz augu augšanu un attīstību tika vērtēta, izmantojot **hidrotermisko koeficientu (HTK**). Tas parāda attiecību starp nokrišņu daudzumu (reizinātu ar 10) un temperatūru summu (>10 °C) vērtētajā periodā. Nokrišņu un temperatūru summu attiecība ir optimāla, ja HTK ir no 1–2 (>2 pārmitrs, <1 pārāk sauss).

REZULTĀTI

Ziemas kviešu augšana un attīstība, ražas veidošanās un kvalitāte

Ziemas kviešu sēja optimālā sējas laikā veikta 2016. gadā (10.09.) un 2019. gadā (19.09.). Novēlots sējas laiks bija 2017. gadā (30.09.), kad sēju aizkavēja biežais nokrišņu daudzums augustā un septembrī. Savukārt, 2018. gadā sējas termiņš bija agrs (06.09.), kas skaidrojams ar sauso un karsto vasaru, kad agri tika novākti priekšaugi, kā arī 5. septembrī bija nedaudz nokrišņu. Ņemot vērā agro sējas termiņu, ziemas kviešu izsējas norma tika samazināta par 50 dīgtspējīgām sēklām m^{-2}, salīdzinot ar iepriekšējiem gadiem, lai neveidotos sabiezināts sējums. Pēc ilgstošā sausuma vasarā, kas diemžēl turpinājās arī septembrī, ziemas kviešu sadīgšana 2018. gada rudenī notika nevienmērīgi.

Mitruma nodrošinājums augsnē ziemas kviešu dīgšanas laikā 2017. gadā bija pietiekams, kas sekmēja salīdzinoši strauju sadīgšanu; dīgšanas sākums fiksēts 13. dienā pēc sējas. Pirmajā uzskaites reizē lielāks sadīgušo augu skaits (p=0.06) bija tradicionālās augsnes apstrādes sistēmā (laukdīdzība 56.3%), bet reducētās augsnes apstrādes variantā laukdīdzība bija 46.2%. Pēc pēdējās laukdīdzības uzskaites datiem, būtiskas atšķirības kviešu laukdīdzība atkarībā no augsnes apstrādes sistēmas netika konstatētas (p=0.66). Pēdējā uzskaitē laukdīdzība bija ļoti augsta: TA 98.3%, bet RA – 96.4%. Priekšauga ietekme uz laukdīdzību netika novērota. Straujākais dīgstu skaita pieaugums notika laikā no pirmās līdz otrajai uzskaites reizei (skat. 3. att.).



3. att. **Ziemas kviešu dīgšanas dinamika no dīgstu parādīšanās piecās uzskaites reizēs ik pēc divām dienām un pēdējā uzskaites reizē** /
Fig. 3. The dynamics of winter wheat field germination from the emergence of first sprouts and after every two days till full field germination
TA / *CT* – tradicionālā augsnes apstrāde / *conventional tillage,* RA / *RT* – reducētā augsnes apstrāde / *reduced tillage;* 1, 2, 3, 4, 5 – uzskaites reizes / *accounting times*

Mitruma nodrošinājums 2018. gada septembrī bija pretējs iepriekšējam rudenim, un kviešu dīgšana bija aizkavējusies sausuma iespaidā, un tā noritēja nevienmērīgi. Pirmā laukdīdzības uzskaite tika veikta 21. dienā pēc sējas, kad RA variantā parādījās pirmie dīgsti, un laukdīdzība būtiski atšķīrās atkarībā no augsnes apstrādes variantiem (p=0.0007), augstāka tā bija RA variantā. Netika konstatēta būtiska (p=0.65) augu maiņas varianta ietekme, tomēr, atsevišķi analizējot augu maiņas ietekmi RA variantā, bija novērojams, ka augstākā laukdīdzība pēdējā uzskaites reizē bija atkārtotos kviešu sējumos (38.7% pirmajā uzskaites reizē, un 84.1% pēdējā uzskaites reizē), kas varētu būt skaidrojams ar izbirušo graudu sadīgšanu atkārtotajos sējumos. Pēdējā dīgstu uzskaites reizē konstatēta būtiski (p=0.02) augstākā laukdīdzība RA variantā – 72.0%, salīdzinot ar TA – 52.5%. Analizējot dīgšanas dinamiku (skat. 3. att.) 2018. gadā, jāsecina, ka, neskatoties uz straujāku dīgstu skaita pieaugumu TA variantā piecās kopīgajās uzskaites reizēs, laukdīdzība TA variantā arī pēdējā uzskaitē bija zema.

Ar optimāliem meteoroloģiskajiem apstākļiem ziemas kviešu sadīgšanai raksturojās 2019. gads, un dīgšana noritēja vienmērīgi. Dīgšanas sākums atzīmēts 12. dienā pēc sējas. Pirmajā laukdīdzības uzskaitē augstāka laukdīdzība konstatēta RA variantā nekā TA variantā (p=0.06) (skat. 3. att.). Pēdējā laukdīdzības uzskaitē būtiskas atšķirības atkarībā no augsnes apstrādes varianta netika konstatētas, un laukdīdzība kopumā bija ļoti augsta – 98.9% TA un 96.4% RA. Augu maiņas ietekme uz laukdīdzību netika konstatēta ne pirmajā (p=0.21), ne noslēdzošajā uzskaitē (p=0.14).

Straujākais dīgšanas temps novērots 2017. gadā TA variantā un 2019. g. RA variantā, kad jau trešajā uzskaites reizē laukdīdzība pārsniedza 90%. Augu maiņas ietekme uz laukdīdzību netika konstatēta nevienā no gadiem.

Ziemcietība visos pētījuma gados bija augsta un novērtēta ar 9 ballēm.

Veģetācijas atjaunošanās laiks pavasarī atšķīrās atkarībā no pētījuma gada; 2019. un 2020. gada pavasarī veģetācija atjaunojās marta II dekādē, 2017. gadā aprīļa II dekādē, un 2018. gadā – aprīļa I dekādē.

Veģetācijas perioda garums 2017. un 2020. gadā bija attiecīgi 214 un 215 dienas. Īsākie veģetācijas periodi bija 2018. un 2019. gadā – attiecīgi 204 un 206 dienas. Šie veģetācijas periodi raksturojās ar paaugstinātām gaisa temperatūrām un pazeminātu nokrišņu daudzumu, kas veicināja straujāku augu attīstību un nobriešanu.

Izturība pret veldri trīs no četrām pētījuma sezonām bija augsta – novērtēta ar 9 ballēm, izņēmums bija 2020. gada vasara, kad spēcīgas lietavas jūnija beigās veicināja ziemas kviešu veldrēšanos. Vidējais izturības pret veldri vērtējums šajā sezonā bija 6.4 balles. Veldre neskāra kviešu bezmaiņas sējumus RA variantā (izturības pret veldri 9.0 balles). Ar vidējo vērtējumu 7.0 balles novērtēti varianti “67% kvieši” abos augsnes apstrādes variantos un “25% kvieši” RA. Izturība pret veldri augu maiņā “25% kvieši” TA variantā bija 5.6 balles. Viszemākā veldres noturība bija kviešu bezmaiņas sējumos (100% kviešu) TA variantā – 2.5 balles. Konstatēta augsnes apstrādes varianta būtiska (p<0.001) ietekme uz ziemas kviešu izturību pret veldri: TA vidēji 5.1 balles, bet RA – 7.7 balles. Konstatēja

ciešu pozitīvu sakarību starp izturību pret veldri un 1000 graudu masu ($r=0.686>r_{0.05}=0.404$, n=24). Analizējot augu biezības un izturības pret veldri savstarpējo sakarību 2020. gadā, augstākais produktīvo stiebru skaits (835 gab. m^{-2}) bija izmēģinājuma laukā, kurā kviešu izturība pret veldri novērtēta ar 1 balli – TA variants, "100% kvieši").

Ziemas kviešu graudu ražu pētījumā būtiski ietekmēja apstākļi pētījuma sezonā ($p<0.001$) un augu maiņas variants (<0.001), bet ražība būtiski neatšķīrās starp pētītajiem augsnes apstrādes variantiem (p=0.33) (skat. 2. tab.).

2. tabula / *Table 2*

Ziemas kviešu vidējā graudu raža (t ha^{-1}) 2017.–2020. gadā atkarībā no augsnes apstrādes sistēmas un augu maiņas varianta /

Average winter wheat grain yield (t ha^{-1}) depending on soil tillage system and crop rotation in 2017–2020

Gads / *Year*	Augsnes apstrāde / *Soil tillage*		Augu maiņa / *Crop rotation*			Vidēji / *Average*
	TA / *CT*	RA / *RT*	100% kvieši / *wheat*	67% kvieši / *wheat*	25% kvieši / *wheat*	
2017	6.87^{a}	7.48^{b}	6.38^{a}	7.08^{a}	8.06^{b}	7.17^{B}
2018	6.24^{a}	6.11^{a}	5.23^{a}	6.65^{b}	-	6.18^{A}
2019	5.70^{a}	5.66^{a}	4.93^{a}	5.46^{b}	6.64^{c}	5.68^{A}
2020	6.30^{a}	6.16^{a}	6.06^{a}	6.22^{ab}	6.41^{b}	6.23^{A}
Vidēji / *Average*	6.28^{A}	6.35^{A}	5.39^{A}	6.40^{B}	6.77^{B}	×
p-vērtība / *p-value*	0.33		<0.001			p<0.001

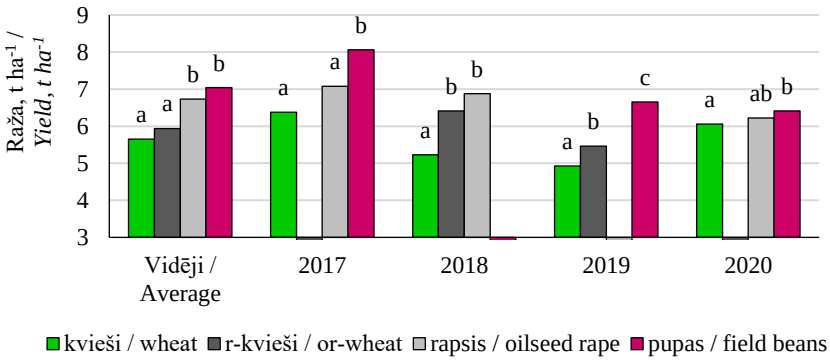
^{A,B} – būtiskas atšķirības starp vidējām vērtībām pētāmā faktora ietvaros visā pētījuma periodā; ^{a,b} – ar mazajiem alfabēta burtiem augšrakstā apzīmētas būtiskas atšķirības starp vidējām vērtībām pētāmā faktora ietvaros katrā izmēģinājuma gadā; TA – tradicionālā augsnes apstrāde; RA – reducētā augsnes apstrāde; 100% kvieši – kviešu bezmaiņas sējumi, 67% kvieši – kvieši augu maiņā ar rapsi (rapsis-ziemas kvieši-ziemas kvieši), 25% kvieši – četru dažādu kultūraugu maiņa (lauka pupas–ziemas kvieši–ziemas rapsis–vasaras mieži) / *^{A,B} – significant differences between the average values over the entire research period ; ^{a,b} – significant differences between the average values within the studied factors in each year of the trial; CT – conventional tillage; RT – reduced tillage; 100% wheat – repeated wheat; 67% wheat – wheat in crop rotation with oilseed rape (oilseed rape- wheat-wheat), 25% wheat – four different crop rotation (field beans-wheat-oilseed rape-spring barley)*

Izmēģinājumā konstatēja būtisku mijiedarbības efektu starp katriem diviem pētītajiem faktoriem uz ziemas kviešu ražu (augsnes apstrādes sistēma × augu maiņa, $p<0.001$; augsnes apstrādes sistēma × gads, $p<0.001$; augu maiņa × gads, p=0.01). Augstākās ražas iegūtas 2017. gadā, kurš raksturojās ar piemērotākajiem mitruma un temperatūras apstākļiem. Aritmētiski zemākā vidējā raža starp pētījuma gadiem iegūta 2019. gadā.

Vidējā ziemas kviešu raža, audzējot tos bezmaiņas sējumos, pētījuma periodā bija 5.39 t ha^{-1}, kas bija būtiski zemāka ($p<0.001$), nekā audzējot augu maiņā

“67% kvieši”) (vidējā raža – 6.40 t ha^{-1}) vai “25% kvieši” (vid. – 6.77 t ha^{-1}). Kviešu ražas, audzējot tos augu maiņā ar citiem kultūraugiem, bija stabili augstākās, nekā ilgstošos kviešu bezmaiņas sējumos.

Analizējot augu maiņās iekļauto ziemas kviešu priekšaugu ietekmi uz vidējo ražu (4. att.), variantos, kur priekšaugs bija citas sugas augs, ražas visos gados un variantos bija augstākas. Vērtējot kviešu ražu katrā no pētījuma gadiem, pastāvēja atšķirības priekšauga ietekmei uz kviešu ražu.



4. att. **Ziemas kviešu graudu raža (t ha^{-1}) atkarībā no priekšauga 2017.-2020. gadā /**
Fig. 4. Winter wheat grain yield (t ha^{-1}) depending on the forecrop in 2017–2020

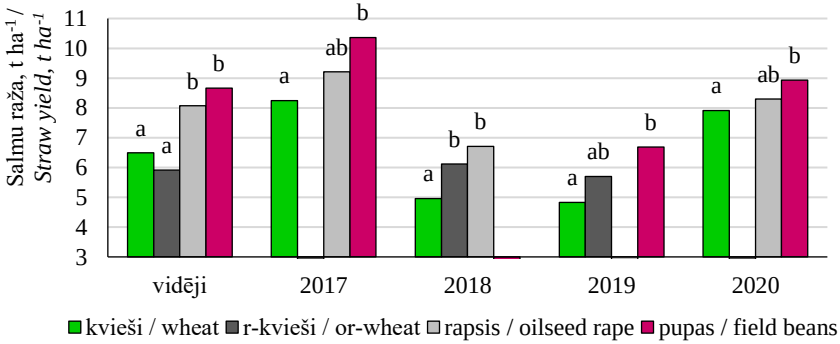
[a,b] – ar atšķirīgiem burtiem apzīmētas būtiskas atšķirības (p<0.001) gada ietvaros; r-kvieši – priekšaugs ziemas kvieši, kuri audzēti pēc rapša. Priekšaugi pētījuma gados analizēti atbilstoši izmēģinājuma plānam / [a,b] – *significant differences are marked within each year with different letters (p<0.001); or-wheat – forcrop winter wheat, which was grown after oilseed rape. Forecrops in the years of the study were analyzed according to the trial plan*

Rapša kā priekšauga pozitīvā ietekme uz ziemas kviešu ražu saglabājās vismaz divus gadus. Iegūtie rezultāti apstiprina augu daudzveidības pozitīvo ietekmi uz ziemas kviešu ražas veidošanos.

Augstākas ražas kviešu bezmaiņas sējumos bijušas, izmantojot TA (izņemot 2017. gadu). Izmantojot reducēto augsnes apstrādi, augstākās kviešu ražas bija variantos ar priekšaugu rapsi vai lauka pupām.

Vidējā kviešu salmu raža pētījuma periodā, līdzīgi kā graudu raža, būtiski neatšķīrās atkarībā no augsnes apstrādes sistēmas (p=0.087), tomēr būtiski augstāka ziemas kviešu salmu raža bijusi 2017. gadā RA variantā. Vidējā salmu raža augu maiņā “25% kvieši” (8.66 t ha^{-1}) bija būtiski augstāka (p<0.001) nekā abos pārējos pētītajos augu maiņas variantos (“67% kvieši” – 6.49 t ha^{-1}; “25% kvieši” – 7.21 t ha^{-1}). Augstākā salmu raža iegūta 2017. gadā (9.27 t ha^{-1}), kad tika iegūtas arī augstākās graudu ražas. Zemākais salmu ražu līmenis bija 2018. gadā (5.93 t ha^{-1}) un 2019. gadā (5.74 t ha^{-1}).

Ziemas kviešu salmu ražas atkarībā no pētītajiem priekšaugiem bijušas būtiski augstākas, ja priekšaugi bija rapsis vai pupas, bet būtiski zemākas, ja priekšaugs bija kvieši (p<0.001) (skat. 5. att.).



5. att. **Ziemas kviešu salmu raža (t ha^{-1}) atkarībā no priekšauga /**
Fig. 5. Winter wheat straw yield (t ha^{-1}) depending on the forcrop

[a,b] – atšķirīgi burti katra gada / laika perioda ietvaros apzīmē būtiskas atšķirības (p<0.001); r-kvieši – priekšaugs ziemas kvieši, kuri audzēti pēc rapša. Priekšaugi pētījuma gados analizēti atbilstoši izmēģinājuma plānam /*Significant differences are marked within each year / time period with different letters (p<0.001) – [a,b]; or-wheat – forcrop winter wheat, which was grown after oilseed rape. Forecrops in the years of the study were analyzed according to the trial plan*

Ziemas kviešu ražas indekss (RI) bija mainīgs pa pētījuma gadiem (p<0.001), bet būtiski neatšķīrās atkarībā no pētītajiem augu maiņas un augsnes apstrādes variantiem. Augstākais ražas indekss bija 2018. un 2019. gadā (0.51 un 0.50 atbilstoši), kas raksturojās ar zemākām ražām un vizuāli tika novērots īss augu garums, kas attiecīgi samazināja salmu masu un palielināja graudu īpatsvaru kopējā biomasā.

Priekšaugam bija būtiska ietekme (p=0.0007) uz ražas indeksa vērtību. Rezultāti uzrādīja, ka augstākais ražas indekss bijis variantos, kur priekšaugs bijis kvieši ("100% kvieši" – 0.47, un "67% kvieši" (priekšaugs kvieši pēc rapša) – 0.50), bet zemākais – variantos, kur priekšaugs bija lauka pupas un rapsis (0.46 un 0.45). Pēc iegūtajiem rezultātiem apstiprinās, ka augstāka biomasas raža (tai skaitā, lielāka salmu masa, ko veido zaļās veģetatīvās augu daļas) nodrošināja augstākas ziemas kviešu graudu ražas. Salmu raža būtiski cieši negatīvi korelēja ar ražas indeksu ($r=|-0.826|>r_{0.05}=0.196$, n=96).

Ziemas kviešu ražas stuktūrelementu (produktīvo stiebru skaits, graudu skaits vārpā un 1000 graudu masa) vērtības būtiski atšķīrās atkarībā no priekšaugiem augu maiņā un veģetācijas sezonām, bet augsnes apstrādes sistēmas ietekme netika konstatēta (3. tabula).

3. tabula / *Table 3*

Ziemas kviešu ražas struktūrelementu vērtības atkarībā no priekšaugiem 2017.–2020. gadā /

The values of winter wheat yield components depending on the forecrop in crop rotation in 2017–2020

Faktors / *Factor*	Produktīvo stiebru skaits, gab. m^{-2} / *Number of spikes m^{-2}*	Graudu skaits vārpā, gab. / *Number of grains per spike*	1000 graudu masa, g / *1000 grain weight, g*
Priekšaugs / *Forecrop*			
kvieši / wheat	526.6^{AB}	29.6^{A}	42.5^{A}
r-kvieši / *or - wheat*	445.9^{A}	32.8^{B}	43.7^{AB}
rapsis / *oilseed rape*	583.2^{B}	28.6^{A}	43.9^{AB}
lauka pupas / *field beans*	592.1^{B}	31.0^{A}	45.2^{B}
p-vērtība / *p-value*	0.002	0.040	<0.001
Gads / *Year*			
2017	558.1^{B}	26.4^{A}	46.1^{B}
2018	530.1^{B}	32.2^{B}	41.8^{A}
2019	401.9^{A}	34.1^{B}	45.2^{B}
2020	684.7^{C}	28.1^{A}	41.7^{A}
p-vērtība / *p-value*	<0.001	<0.001	<0.001

^{A,B,C} – ar dažādiem lielajiem burtiem augšrakstā apzīmētas būtiskas atšķirības starp vidējām vērtībām faktoru ietvaros; r-kvieši – priekšaugs ziemas kvieši, kuri audzēti pēc rapša / ^{A,B,C} – *different capital letters in the superscript indicate significant differences between mean values within factors; or-wheat – forecrop winter wheat, which was grown after oilseed rape*

Vidējais produktīvo stiebru skaits būtiski zemākais bija 2019. gadā (401.9 gab. m^{-2}), ko ietekmēja nepietiekamais nokrišņu daudzums 2018. gada vasarā un rudenī, kas savukārt ietekmēja augu sadīgšanu. Zemākais produktīvo stiebru skaits iegūts augu maiņā, kur ziemas kviešu priekšaugs bija kvieši (r-kvieši), audzējot tos augu maiņā "67% kvieši" (3. tab.), tomēr šajā variantā dati iegūti tikai 2018. un 2019. gadā, kuri izcēlās ar ekstremālo sausumu, tādējādi pasliktinot arī kopējo vidējo rādītāju.

Graudu skaits ziemas kviešu vārpā būtiski atšķīrās atkarībā no pētījuma gadiem ($p<0.001$) un arī atkarībā no priekšaugiem augu maiņā ($p=0.04$) (skat. 3. tab.). Augstākais graudu skaits bija augu maiņā "67% kvieši", ar priekšaugu – kvieši pēc rapša, un augu maiņā "25% kvieši". Augstais graudu skaits vārpā pēc rapša kā priekšauga, var būt skaidrojams ar datiem, kuri iegūti gados, kad bija zemākais produktīvo stiebru skaits šajā variantā (2018., 2019. g.). Konstatēta būtiska ($p<0.001$) negatīva sakarība starp produktīvo stiebru skaitu un graudu skaitu vārpā($r=|-0.480|>r_{0.05}=0.200$; $n=96$).

Pētījuma periodā augstākā vidējā 1000 graudu masa tika iegūta 2017. gadā (46.1 g) un 2019. gadā (45.2 g), kas bija būtiski augstāka salīdzinājumā ar vērtībām 2018. un 2020. gadā (41.8 un 41.7 g, atbilstoši) (3. tab.). Augstāku 1000 graudu masu 2017. gadā bija iespējams iegūt, jo HTK svarīgos attīstības

etapos (sākot no vārpošanas līdz novākšanas gatavībai) bija optimālajās robežās, savukārt 2019. gadā augstāka 1000 graudu masa varēja veidoties samazinātā produktīvo stiebru skaita (vid. 401.9 gab. m^{-2}) dēļ, neskatoties uz to, ka katra individuālā vārpa bija produktīvāka nekā pārējos pētījuma gados. Turpretim, 2018. gadā 1000 graudu masas zemais rādītājs varēja veidoties nepietiekama mitruma nodrošinājuma iespaidā (HTK periodā no stiebrošanas sākuma līdz novākšanas gatavībai bija <0.5). Savukārt, 2020. gada zemo vidējo 1000 graudu masu ietekmēja augu veldrēšanās, kas traucēja graudu pilnvērtīgu pildīšanos, kā arī šajā gadā bija augstākais vidējais produktīvo stiebru skaits 1 m^2. Pētījuma periodā vidējā 1000 graudu masa bijusi augstāka, audzējot kviešus augu maiņā "25% kvieši" (45.2 g), bet būtiski zemāka – kviešu bezmaiņas sējumos (42.5 g). Pastāvēja būtiska (p=0.0002) sakarība starp izturību pret veldri ballēs un 1000 graudu masu 2020. gadā.

Netika konstatēta augsnes apstrādes sistēmas un augu maiņas varianta ietekme uz pētītajiem kvalitātes rādītājiem (proteīna, lipekļa un cietes saturs, %; Zeleny indekss, krišanas skaitlis, s; tilpummasa, kg hL^{-1}), tomēr atsevišķi vērtētie kvalitātes rādītāji atšķīrās atkarībā no priekšauga augu maiņā, kā arī visi rādītāji būtiski atšķīrās atkarībā no pētījuma sezonām (skat. 4. tab.).

Proteīna saturs (%) būtiski atšķīrās atkarībā no pētījuma sezonas (p<0.001) (4. tab.), vidēji augstākais tas bija 2019. gadā – 13.8%, bet zemākais 2018. gadā – 10.2%.

4. tabula / *Table 4*

Pētīto faktoru ietekme (p-vērtība) uz ziemas kviešu graudu kvalitātes rādītāju vidējām vērtībām /

Impact of the of the studied factors (p-value) on the average values of winter wheat grain quality indicators

Faktors / *Factor*	PS / *CP*, %	CS / *SC*, %	LS / *GC*, %	ZI / *ZI*	KS / *FN*, *s*	TM / *VW*, *kg hL*$^{-1}$
Augsnes apstrāde / *Soil tillage*	0.816	0.810	0.725	0.724	0.468	0.677
Augu maiņa / *Crop rotation*	0.299	0.327	0.199	0.125	0.858	0.270
Priekšaugs / *Forecrop*	0.394	**0.019**	0.052	**0.040**	0.956	0.447
Gads / *Year*	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**<0.001**	**0.018**	**<0.001**

PS – proteīna saturs, CS – cietes saturs, LS – lipekļa saturs, ZI – Zeleny indekss, KS – krišanas skaitlis, TM – tilpummasa; treknrakstā izceltas p-vērtības, kuras norāda uz būtisku faktora ietekmi / *CP – crude protein content, SC - starch content, GC - gluten content, ZI – Zeleny index, FN – falling number, VW – volume weight; p-values that indicate a significant factor effect are highlighted in bold.*

Lipekļa saturs (%) starp visiem pētījuma gadiem būtiski atšķīrās, un augstākais tas bija 2019. gadā – 29.7%, sekojoši 2020. gadā – 22.8%, 2017. gadā –20.9% un 2018. gadā –18.5%. Augstākais lipekļa saturs bija augu maiņā "25% kviešu".

Zeleny indeksa augstākā vērtība līdzīgi kā proteīna saturs bija 2019. gadā – 51.7, bet zemākais – 2018. gadā – 22.8. Analizējot katru pētījuma gadu atsevišķi, noskaidrots, ka Zeleny indeksa vērtības būtiski atšķīrās atkarībā no augsnes apstrādes varianta 2017. un 2020. gadā: RA variantā augstāks Zeleny indekss bija 2017. gadā, bet TA – 2020. gadā.

Tilpummasas (kg hL^{-1}) augstākā vidējā vērtība bija 2017. gadā (81.3 kg hL^{-1}), zemākā – 2020. gadā (74.2 kg hL^{-1}), un pastāvēja būtiskas atšķirības starp visiem izmēģinājuma gados iegūtajiem tilpummasas lielumiem. Analizējot katru pētījuma gadu atsevišķi, noskaidrots, ka augu maiņa kā faktors būtiski ietekmējusi graudu tilpummasu katrā pētījuma gadā atsevišķi, neskatoties uz to, ka vidējām vērtībām augu maiņas varianta ietekme nepierādījās. Visos pētījuma gados, izņemot 2017. gadu, augu maiņā "100% kvieši" iegūtā tilpummasa bija zemākā, bet augu maiņā "25% kvieši" – augstākā, kā arī būtiski augstāka nekā variantā "100% kvieši".

Krišanas skaitlis (s) visā pētījuma laikā bija augsts, vidējais radītājs starp pētījuma sezonām bija no 329–346 s. Novērotas būtiskas ($p=0.018$) atšķirības atkarībā no pētījuma gadiem (4. tab.), bet skaitliski starpība veidoja tikai 17 s, kas nav uzskatāma par agronomiski nozīmīgu pie augstām krišanas skaitļa vērtībām.

Cietes saturs (%) būtiski ($p=0.019$) atšķīrās atkarībā no priekšauga augu maiņā (skat. 4. tab.). Cietes satura izmaiņas kviešu graudos var būt saistītas ar proteīna satura atšķirībām kviešu graudos atkarībā no augu maiņu variantiem Vidējās cietes satura vērtības atkarībā no priekšauga variēja vien 1.3% robežās (68.7%–70.0%).

Ziemas kviešu graudu kvalitāte 2017., 2018. un 2020. gadā vairumā variantu atbilda izmantošanai lopbarībā (skatīt 5. tab.). Vienīgi 2019. gadā atbilstoši LPKS "Latraps" iepirkuma prasībām visos variantos iegūti pārtikas kvalitātes graudi.

Analizējot katru gadu atsevišķi, noskaidrots, ka 2017. gadā pārtikas kvalitātes graudi iegūti variantā "100% kvieši, RA", limitējošie rādītāji – proteīna un lipekļa saturs. Savukārt, 2018. gadā pārtikas kvalitātei atbilda variantā "67% kvieši, RA" iegūtie graudi pēc rapša kā priekšauga, limitējošais rādītājs – lipekļa saturs. Augstākās kvalitātes graudi tika iegūti 2019. gadā, atbilstību graudu kvalitātes grupai limitēja tilpummasas rādītājs. Atbilstību kvalitātes grupām 2020. gadā limitēja atšķirīgi kvalitātes rādītāji, bet iegūtie graudi atbilda lopbarības kvalitātes grupai, izņemot variantu "25% kvieši, TA".

5. tabula / *Table 5*

Ziemas kviešu graudu kvalitātes atbilstība LPKS "Latraps" prasībām 2022. gadā /
Compliance of winter wheat grain quality with LPKS "Latraps" requirements in 2022

Augu maiņas variants un priekšaugs / *Crop rotation and forecrop*	Augsnes apstrāde / *Soil tillage*	Gads / *Year*			
		2017	2018	2019	2020
100% kvieši / *100% wheat*	TA	L	L	B1	L
	RA	B3	L	B1	L
67% kvieši, priekšaugs kvieši / *67% wheat, forecrop - wheat*	TA	-	L	B1	-
	RA	-	L	A3	-
67% kvieši, priekšaugs rapsis / *67% wheat, forecrop – oilseed rape*	TA	L	B5	-	L
	RA	L	L	-	L
25% kvieši, priekšaugs lauka pupas/ *25% wheat, forecrop – field beans*	TA	L	-	B1	B3
	RA	L	-	A3	L

TA – tradicionālā augsnes apstrādes sistēma; RA – reducētā augsnes apstrādes sistēma. L – kviešu lopbarības kvalitātes grupa; A3, B1, B3, B5 – kviešu graudu pārtikas kvalitātes grupas / *CT – conventional tillage, RT – reduced tillage, L – feed quality group for wheat grain, A3, B1, B3, B5 – food quality groups for wheat*

Atbilstību lopbarības kvalitātes grupai lielākajā daļā variantu 2020. gadā ietekmēja zemais lipekļa satura rādītājs, izņēmums bija variants "100% kvieši, TA", kur tika iegūti sīki graudi ar zemu tilpummasu, jo laukus skāra veldre graudu pildīšanās laikā.

Pārējo pētīto kultūraugu ražas un kvalitātes veidošanās

Ziemas rapša sēklu raža pētījuma laikā no 2017. līdz 2020. gadam būtiski atšķīrās atkarībā no pētījuma sezonām ($p<0.001$), bet netika novērotas atšķirības starp ražību pētītajās augsnes apstrādes sistēmās ($p=0.81$) vai augu maiņas variantos ($p=0.278$), kuros rapsis audzēts pētījuma laikā.

Ražu atšķirības pētījuma gados var skaidrot ar meteoroloģiskajiem apstākļiem pētījuma sezonās, bet tā kā katrā pētījuma gadā tika audzētas dažādas šķirnes, tad arī starp šķirņu spēju nodrošināt ražu konkrētos apstākļos varēja pastāvēt būtiskas atšķirības. Augstākā rapša raža iegūta 2020. gadā 3.95 t ha^{-1}.

Rapša ražas indekss bija zemākais starp visiem augu maiņās audzētajiem kultūraugiem, vidēji – 0.3. Ražas indekss nebija būtiski atšķirīgs atkarībā no pielietotajām augsnes apstrādes sistēmām, bet bija mainīgs pa pētījuma gadiem. Ražas indekss varētu atšķirties arī izmantoto dažādo šķirņu dēļ, lai arī šķirņu raksturojumos netika atrasts, ka kāda no šķirnēm būtu ar pundurainības gēnu.

Ziemas rapša augu skaits m^{-2} pētījuma periodā matemātiski būtiski atšķīrās atkarībā no augsnes apstrādes sistēmas (p=0.003), atšķirības nepierādījās vidējam augu skaitam atkarībā no pētījuma sezonām (p=0.347) un augu maiņas varianta (p=0.165) (skat. 6. tab.). Salīdzinot augsnes apstrādes variantus, konstatēts, ka būtiski augstāks augu skaits izmēģinājuma periodā bijis, izmantojot TA (41.6 gab. m^{-2}) salīdzinājumā ar RA (32.2 gab. m^{-2}) variantu.

6. tabula / *Table 6*

Atsevišķi ziemas rapša ražas struktūrelementi un kvalitātes rādītāji 2017.–2020. gadā /

Some yield components and quality indices of winter oilseed rape 2017–2020

Faktors / *Factors*	Augu skaits m^{-2}./ *Number of spikes m^{-2}*	1000 sēklu masa / *1000 seed weight, g*	Tilpum-Masa / *Volume weight,* g L^{-1}	Eļļas saturs / *Oil content, %*
Augsnes apstrāde / *Soil tillage*				
Tradicionālā / *conventional*	41.6^{B}	5.06^{A}	665.1^{A}	42.8^{A}
Reducētā / *reduced*	32.2^{A}	5.11^{A}	668.1^{A}	42.4^{A}
p-vērtība / *p-value*	0.003	0.712	0.573	0.219
Augu maiņa / *Crop rotation*				
67% kvieši / *wheat*	40.1^{A}	5.21^{A}	672.7^{A}	41.9^{A}
25% kvieši / *wheat*	33.4^{A}	4.99^{A}	661.8^{A}	43.1^{A}
p-vērtība / *p-value*	0.165	0.410	0.092	0.721
Gads / *Year*				
2017	35.4^{A}	5.33^{B}	656.5^{B}	43.0^{B}
2018	34.0^{A}	4.30^{A}	637.4^{A}	46.2^{C}
2019	44.3^{A}	5.15^{B}	692.3^{C}	42.6^{B}
2020	36.7^{A}	5.24^{B}	685.3^{C}	40.3^{A}
p-vērtība / *p-value*	0.347	<0.001	<0.001	<0.001

^{A,B,C} – ar dažādiem burtiem apzīmētas būtiskas atšķirības starp rādītājiem faktora ietvaros/ ^{A,B,C} – *with different letters significant differences are indicated for the indices within the studied factors*

Rapša 1000 sēklu masa izmēģinājumā būtiski atšķīrās atkarībā no pētījuma sezonas (p<0.001), ko varēja ietekmēt gan atšķirīgie meteoroloģiskie apstākļi, gan tas, ka lietoja atšķirīgas šķirnes, bet augsnes apstrādes variants un augu maiņa to nebija ietekmējuši būtiski (p=0.712 un p=0.406, atbilstoši) (skat. 6. tab.).

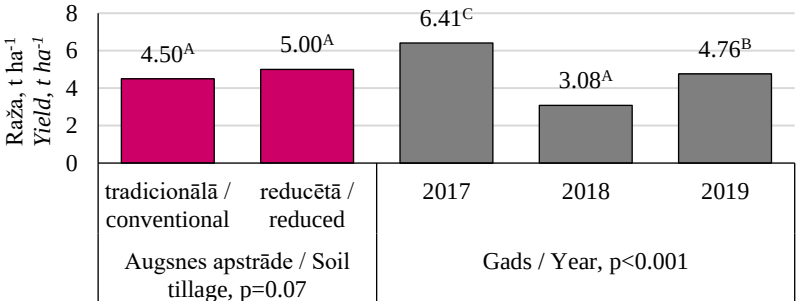
Ziemas rapša tilpummasa (skat. 6. tab.) būtiski atšķīrās atkarībā no pētījuma gada (p<0.001), tā bija no 637.4 kg hL^{-1} 2018. gadā (iegūta zemākā 1000 sēklu masa), līdz 692.3 kg hL^{-1} (2019. gadā), atšķirīgas iegūtās tilpummasas arī varētu būt gan šķirņu ģenētisko īpašību, gan arī gada apstākļu ietekmētas.

Eļļas saturs ziemas rapša sēklās visos variantos pārsniedza pieņemto eļļas bāzes saturu un bija virs 40% (6. tab.).

Starp rapša sēklu kvalitātes rādītājiem pastāvēja būtiskas sakarības. Sēklās ar augstāku 1000 sēklu masu bija koncentrējies zemāks eļļas saturs ($r=|-0.593|>r_{0.05}=0.292$, $n=0.44$), bet sēklām ar augstāku eļļas saturu bija augstākā enerģētiskā vērtība ($r=0.792>r_{0.05}=0.292$, $n=0.44$).

Promocijas darba pētījumā neizdevās pierādīt būtiskas rapša ražas atšķirības atkarībā no tā sēšanas biežuma augu maiņā – reizi trīs gados, ja starpaugs divus gadus ir kvieši, vai reizi četros gados, ja starpaugi bija divas labību sugas un pākšaugs. Pētījuma periods bija pārāk īss, un daži gadi bija ļoti netipiski meteoroloģisko apstākļu ziņā.

Vasaras miežu graudu ražas līmeni pētījuma laikā būtiski ietekmēja izmēģinājumu sezona ($p<0.001$), un novērota tendence arī augsnes apstrādes sistēmas ietekmei uz ražas apjomu ($p=0.07$) (skat. 6. att.). Augstākās ražas iegūtas 2017. gadā (6.41 t ha^{-1}), kurš raksturojās ar optimālākiem mitruma un temperatūras apstākļiem. Zemākā vidējā raža iegūta 2018. gadā (3.08 t ha^{-1}), kad bija zems nokrišņu daudzums agrīnās miežu augšanas un attīstības fāzēs, tādejādi kavējot un traucējot dīgšanu; arī stiebrošanas un graudu pildīšanās laikā nokrišņu bija maz, kas kopā samazināja ražu. Vidējais ražas līmenis, kurš būtiski atšķīrās no augstākā un zemākā, iegūts 2019. gadā (4.76 t ha^{-1}).



6. att. **Vasaras miežu raža (t ha^{-1}) atkarībā no augsnes apstrādes sistēmas un pētījuma gada 2017.– 2019. g. /**

Fig 6. Spring barley yield (t ha^{-1}) depending on the soil tillage system and study year 2017– 2019

A,B,C – ar dažādiem burtiem augšrakstā apzīmētas būtiskas atšķirības faktora ietvaros/

A,B,C different letters in the superscript indicate significant differences within the studied factors

Ražas atšķirības atkarībā no augsnes apstrādes variantiem 2018. gadā sasniedza 0.98 t ha^{-1} (TA 2.59 t ha^{-1}; RA 3.57 t ha^{-1}). Lielā ražas starpība skaidrojama ar to, ka sausajā 2018. gada pavasarī RA variantā augiem, iespējams, bija pieejams vairāk mitruma, kas bija svarīgi vārpas veidošanās laikā, kad formējās graudu skaits. Lai arī iegūtie rezultāti norāda uz iespēju mazināt augsnes apstrādes intensifikāciju vasaras miežiem, tomēr jāņem vērā, ka vidējās

ražas atšķirības atkarībā no pētījumā iekļautajiem augsnes apstrādes variantiem galvenokārt nodrošināja lielā un būtiskā ražu diference tieši sausajā 2018. gadā.

Vasaras miežu ražas indekss pētījuma periodā bija vidēji 0.43. Ražas indekss pētījuma laikā būtiski atšķīrās atkarībā no pētījuma sezonām ($p<0.002$). Augstākais ražas indekss bija 2017. gadā – 0.46, un būtiski zemāks – 2018. un 2019. gadā (0.42 un 0.41, atbilstoši).

Vasaras miežu ražas struktūrelementu vērtības būtiski atšķīrās starp veģetācijas sezonām (7. tab.), bet neviens no rādītājiem būtiski neatšķīrās atkarībā no augsnes apstrādes sistēmām ne vidēji visā periodā, ne katra atsevišķā gada ietvaros.

7. tabula / *Table 7*

Vasaras miežu ražas struktūrelementu vērtības 2017.–2019. gadā /
Spring barley yield components in 2017–2019

Gads / *Year*	Produktīvo stiebru skaits m^{-2} / *Productive spikes m^{-2}*, $p<0.001$	Graudu skaits vārpā, gab. / *Grain per spike*, $p<0.001$	1000 graudu masa / *1000 grain weight*, g, $p<0.001$
2017	764^{B}	16.2^{AB}	51.6^{A}
2018	526^{A}	16.0^{A}	51.9^{A}
2019	567^{A}	17.1^{B}	57.5^{B}

^{A,B} – ar dažādiem lielajiem burtiem augšrakstā apzīmētas būtiskas atšķirības atkarībā no augsnes apstrādes sistēmām katrā izmēģinājuma gadā / ^{AB} – *different capital letters in the superscript indicate significant differences depending on trial year*

Cieša pozitīva sakarība vasaras miežu ražai ar produktīvo stiebru skaitu konstatēta 2017. gadā ($r=0.766>r_{0.05}=0.707$, $n=8$), bet 2018. gadā ražas lielumam bija būtiska pozitīva sakarība ar graudu skaitu vārpā ($r=0.757>r_{0.05}=0.707$, $n=8$);

Graudu kvalitātes rādītāji (proteīna saturs, tilpummasa, cietes saturs) būtiski atšķīrās atkarībā no pētījuma sezonām (abiem $p<0.001$), bet tie nebija būtiski atšķirīgi atkarībā no pētītajiem augsnes apstrādes variantiem (tilpummasai $p=0.830$; proteīna saturam $p=0.383$, cietes saturam $p=0.169$) (skat. 8. tab.).

8. tabula / *Table 8*

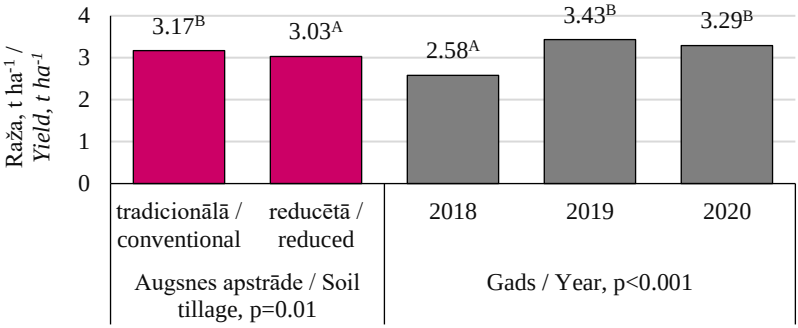
Vasaras miežu graudu kvalitātes rādītāji 2017.–2019. gadā /
Spring barley grain quality indicators in 2017–2019

Gads / *Year*	Tilpummasa / *Volume weight*, kg hL^{-1}, $p<0.001$	Proteīna saturs / *Protein content*, %, $p=0.032$	Cietes saturs / *Starch content*, %, $p<0.001$
2017	61.1^{B}	10.6^{A}	62.1^{C}
2018	59.8^{B}	13.1^{B}	60.5^{B}
2019	57.4^{A}	13.4^{B}	59.7^{A}

^{A,B,C} – ar dažādiem lielajiem burtiem augšrakstā apzīmētas būtiskas atšķirības atkarībā no izmēģinājuma gada / ^{A,B,C} – *different capital letters in the superscript indicate significant differences depending on trial year*

Ražas apjomam ar proteīna saturu konstatēta cieša negatīva sakarība visā pētījuma periodā ($r=|-0.807|>r_{0.05}=0.404$, n=24). Cietes saturam pastāvēja negatīva cieša sakarība ar proteīna daudzumu graudos ($r=|-0.932|>r_{0.05}=0.404$, n=24), bet pozitīva cieša sakarība ar graudu tilpummasu ($r=0.834>r_{0.05}=0.404$, n=24). Cietes saturu būtiski ietekmēja mijiedarbība augsnes apstrādes sistēmai × gadam (p=0.0001).

Lauka pupu raža 2018.–2020. g. bija būtiski atšķirīga atkarībā no augsnes apstrādes varianta (p=0.01) un pētījuma gada (p<0.001) (skat. 7. att.). Augstākās ražas iegūtas 2019. un 2020. gadā (3.43 un 3.29 t ha^{-1}, atbilstoši), bet būtiski zemāka – 2018. gadā, kurš jau iepriekš aprakstīts kā ekstremāli sauss. Lai arī 2019. gadā HTK nebija pietiekošs, tomēr temperatūras un nokrišņu sadalījums ziedēšanas un pākšu pildīšanās laikā bija labvēlīgāks nekā 2018. gadā, kas rezultējās augstākā ražā. Raža 2020. gadā būtiski neatšķīrās no 2019. gada ražas, tāpat kā ražas struktūrelementu vērtības.



7. att. **Lauka pupu raža (t ha^{-1}) atkarībā no augsnes apstrādes varianta un pētījuma gada 2018.–2020. g. /**

Fig. 7. Field bean seed yield (t ha^{-1}) depending on the soil tillage system and study year, 2017–2019

^{A,B} – ar atšķirīgiem alfabēta burtiem apzīmētas būtiskas atšķirības pētīto faktoru ietvaros / *^{A,B} different letters in the superscript indicate significant differences within the factors*

Lauka pupas vidēji bija ražīgākas TA variantā (vidēji 3.17 t ha^{-1}) nekā RA (vidēji 3.03 t ha^{-1}) (p=0.01). Vidējās lauka pupu ražu starpības atkarībā no augsnes apstrādes varianta visos pētījuma gados nebija augstas: 230 kg ha^{-1} 2018. gadā, 90 kg ha^{-1} 2019. gadā, un 100 kg ha^{-1} 2020. gadā. Lielākā diference starp abiem variantiem bija sausajā 2018. gadā, kad tika iegūtas zemākās ražas.

Lauka pupus ražas indekss vidēji bija 0.485 un tas bija līdzvērtīgs visos pētījuma gados un abos augsnes apstrādes variantos (p>0.05).

Lauka pupu ražas struktūrelementu vērtības būtiski atšķīrās starp veģetācijas sezonām (skat. 9. tab.), bet augsnes apstrādes sistēmas būtiska ietekme novērota tikai uz 1000 graudu masu (p<0.001), kura vidēji bija augstāka RA variantā.

9. tabula / *Table 9*

Lauka pupu ražas struktūrelementu vērtības 2018.–2020. g./
Field bean yield components in 2018–2020

Rādītājs / *Indicator*	Gads / *Year*		
	2018	2019	2020
Augu skaits, gab. m^{-2} / *Plants per m^2,* p=0.0001	47.8^B	32.8^A	35.4^A
Pākšu skaits augam, gab. / *Pods per plant,* =0.0003	5.1^A	10.2^B	9.0^B
Sēklu skaits pākstī, gab. / *Seeds per pod,* p=0.203	2.7^A	2.6^A	2.7^A
1000 sēklu masa, g / *1000 seed weight, g,* p<0.001	468.2^A	546.1^B	476.2^A

$^{A, B}$ – ar dažādiem lielajiem burtiem augšrakstā apzīmētas rādītāju būtiskās atšķirības atkarībā no pētījuma gadiem / ^{A,B} – *different capital letters in the superscript indicate significant differences for indices depending on trial year*

Konstatēta cieša pozitīva sakarība starp pākšu skaitu augam un iegūto pupu sēklu ražu ($r=0.830>r_{0.05}=0.404$, n= 24), negatīva cieša sakarība konstatēta augu skaitam m^{-2} ar pākšu skaitu augam ($r=|-0.852|>r_{0.05}=0.404$). Tūkstoš sēklu masa būtiski cieši pozitīvi korelēja ar lauka pupu kvalitātes rādītāju – tilpummasu ($r=0.829>r_{0.05}=0.404$, n=24).

Lauka pupām sēklu proteīna saturs (%) izmēģinājuma periodā bija vidēji 32.3%, un tas bija stabils neatkarīgi no pētījuma sezonām (p=0.233) un izmantotā augsnes apstrādes varianta (p=0.658). Vidējā tilpummasa būtiski atšķīrās atkarībā no pētītā augsnes apstrādes varianta (p<0.001), augtākā bija RA variantā (756.4 g L^{-1}), zemākā – TA (735.5 g L^{-1}). Augstāko vidējo tilpummasu reducētās augsnes apstrādes variantā nodrošināja lielā tilpummasu starpība 2018. gadā, kad sausuma un karstuma apstākļos, acīmredzot, augi bija labāk apgādāti ar mitrumu un barības vielām RA variantā. Reducētās augsnes apstrādes variantā 2018. gadā iegūta arī būtiski augstāka 1000 sēklu masa. Starp pētījuma gadiem būtiski (p<0.001) augstākā vidējā tilpummasa veidojās 2019. gadā (773.3 g L^{-1}), kad konstatēta arī būtiski augstākā 1000 sēklu masa (546.1 g).

Analizējot sakarības starp dažādiem analizētajiem rādītājiem, būtiska cieša pozitīva korelācija konstatēta tikai 2018. gadā starp 1000 sēklu masu un tilpummasu ($r=0.983>r_{0.05}=0.707$, n=8).

Promocijas darba izmēģinājumā kultūraugu raža atkarībā no lietotās augsnes apstrādes sistēmas bija matemātiski būtiski atšķirīga, tikai audzējot lauka pupas, kurām augstāka vidējā raža iegūta tradicionālās augsnes apstrādes variantā, bet pārējiem pētītajiem laukaugiem vidējais ražas līmenis matemātiski būtiski 95% līmenī nebija atšķirīgs atkarībā no lietotās augsnes apstrādes sistēmas.

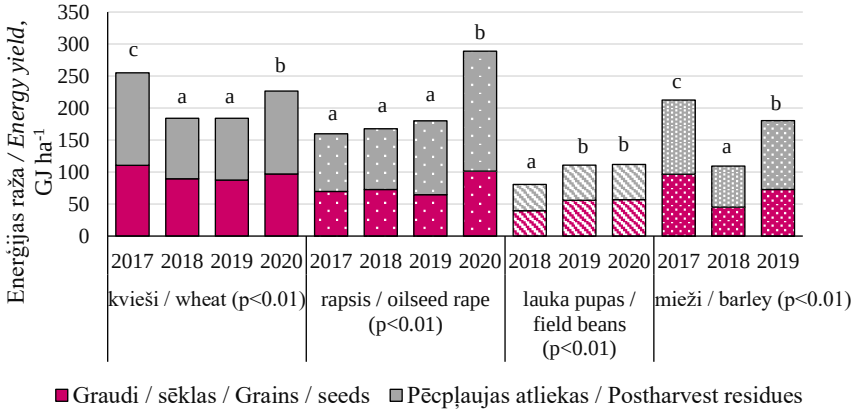
Augu biomasas enerģijas raža

Augu maiņās ietvertie kultūraugi viens no otra atšķīrās gan pēc iegūtā pamatprodukcijas un blakusprodukcijas masas apjoma (t ha^{-1}), gan biomasas daļu ķīmiskā sastāva, kas nosaka to atšķirīgu enerģētisko ietilpību jeb vērtību (MJ kg^{-1}). Augstākā enerģētiskā ietilpība starp pētījumā iekļautajiem kultūraugiem un to biomasas daļām bija ziemas rapša sēklām – vidēji 28.58 MJ kg^{-1}. Starp rapša eļļas saturu un sēklu enerģētisko ietilpību pastāvēja būtiska cieša sakarība ($r=0.792>r_{0.05}=0.292$, n=44). Nākamās vidēji enerģētiski ietilpīgākās bija lauka pupu sēklas (18.96 MJ kg^{-1}). Labību sugu graudu enerģētiskā ietilpība (kviešiem vidēji – 17.75 MJ kg^{-1}, miežiem – 17.46 MJ kg^{-1}) bija zemāka, kā šo pašu sugu salmu enerģētiskā ietilpība (ziemas kviešiem – 18.37 MJ kg^{-1}, vasaras miežiem – 17.83 MJ kg^{-1}). Pēcpļaujas atlieku enerģētiskajai vērtībai starp pētītajām sugām nepastāvēja lielas atšķirības. Augstākā vidējā enerģētiskā ietilpība bija ziemas kviešu salmiem (vidēji 18.37 MJ kg^{-1}), bet zemākā – lauka pupu pēcpļaujas atliekām (vidēji 17.82 MJ kg^{-1}).

Augsnes apstrādes varianta ietekme uz kultūraugu sēklu un pēcpļaujas atlieku enerģētisko ietilpību netika atrasta ($p>0.05$), bet tika konstatēta būtiska priekšauga ietekme ($p<0.001$) uz ziemas kviešu graudu un salmu vidējo enerģētisko ietilpību. Augstākā enerģētiskā ietilpība bija ziemas kviešu graudiem, kuri iegūti, ja priekšaugs bija lauka pupas (18.01 MJ kg^{-1}), savukārt ziemas kviešu salmiem, kas iegūti, audzējot kviešus pēc lauka pupām, bija zemākā enerģētiskā ietilpība (18.21 MJ kg^{-1}).

Pētījumā iekļautie kultūraugi nodrošināja atšķirīgas vidējās enerģijas ražas katrā no pētījuma sezonām (skat. 8. att.). Augstākā enerģētiskā produktivitāte bija ziemas kviešiem (vidējā pētījuma periodā iegūtā enerģijas raža – 212.43 GJ ha^{-1}) un ziemas rapsim (vidējā iegūtā enerģijas raža – 209.99 GJ ha^{-1}). Būtiski zemāku vidējo enerģijas ražu nodrošināja vasaras mieži (vidēji – 167.42 GJ ha^{-1}), bet viszemākā (būtiski atšķiroties no miežu enerģijas ražas līmeņa, $p<0.001$) enerģijas raža bija lauka pupām – 101.13 GJ ha^{-1}. Ziemas kviešiem augstākā vidējā enerģijas raža iegūta 2017. un 2020. gadā (254.90 un 226.59 GJ ha^{-1}, atbilstoši), ziemas rapsim – 2020. gadā (288.89 GJ ha^{-1}), lauka pupām 2019. un 2020. gadā (110.82 un 111.91 GJ ha^{-1}), vasaras miežiem 2017. un 2019. gadā (212.53 un 180.38 GJ ha^{-1}, atbilstoši).

Iegūtā enerģijas raža atkarībā no augu maiņas un augsnes apstrādes varianta bija mainīga pa gadiem (8. att.). Būtiskas enerģijas ražas atšķirības pētījuma periodā atkarībā no augsnes apstrādes variantiem netika konstatētas ($p=0.553$). Vidējā iegūtā enerģijas raža četru gadu periodā TA variantā bija 188.9 GJ ha^{-1} gadā un RA – 193.9 GJ ha^{-1}.



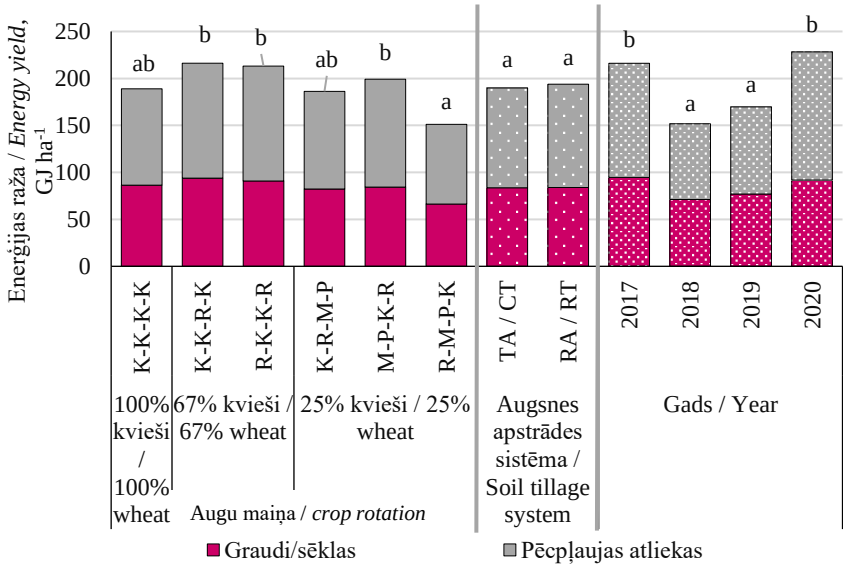
8. att. **Augu maiņās iekļauto kultūraugu vidējā enerģijas raža (GJ ha^{-1}) no graudiem / sēklām un pēcpļaujas atliekām pētījuma gados, kuros kultūraugi tika audzēti /**

Fig. 8. Average energy yield (GJ ha^{-1}) from grains/seeds and post-harvest residues of the crops included in the crop rotations during the study years in which the crops were grown

^{a,b,c} – ar atšķirīgiem burtiem norādītas būtiskas (p<0.05) atšķirības kultūrauga ietvaros atkarībā no gada / ^{a,b,c} – *significant (p<0.05) differences for each crop are indicated depending on the years*

Salīdzinot augu maiņas variantus pēc nodrošinātās enerģijas ražas (p=0.0004), augstākais enerģijas iznākums biomasas ražā bija akumulējies augu maiņā "67% kvieši" – vidēji 214.7 GJ ha^{-1} gadā, bet zemākais augu maiņā "25% kvieši" (178.8 GJ ha^{-1}). Kviešu atkārtotos sējumos (augu maiņa "100% kvieši") iegūtā enerģijas raža (188.6 GJ ha^{-1}) būtiski neatšķīrās no abos pārējos variantos iegūtās enerģijas ražas.

Ņemot vērā krasās ražas atšķirības vasarāju kultūraugiem pa pētījumu sezonām, katrs augu maiņas variants tika analizēts atsevišķi ar konkrētajā laukā izveidoto kultūraugu maiņu pētījuma periodā, jo vidējie iegūtie rezultāti divās īpaši sausajās sezonās (2018. un 2019. gads) pasliktināja augu maiņas "25% kvieši" potenciālu iegūt augstu vidējo enerģijas ražu (skat. 9. att.). Veicot novērtējumu vidējai iegūtajai enerģijas ražai gadā atbilstoši katrā izmēģinājuma variantā iegūtajiem rezultātiem, secināts, ka viszemākais enerģijas iznākums bija augu maiņā "25% kvieši" (secība: ziemas rapsis–mieži–lauka pupas–ziemas kvieši), kur secīgi 2018. un 2019. gadā tika audzēti vasarāji (mieži un pupas), kas rezultējās zemā biomasas ražā un, pārrēķinot enerģijas iznākumu, tas bija 150.96 GJ ha^{-1}.



9. att. **Vidējā gadā iegūtā enerģijas raža (GJ ha^{-1}) atkarībā no augu maiņās iekļauto kultūraugu kombinācijām 2017.–2020. gadā un augsnes apstrādes varianta /**

Fig. 9. Average annual energy yield (GJ ha^{-1}) depending on combinations of crops included in crop rotations and soil tillage system from 2017 to 2020

K – kvieši / *wheat*, R – rapsis / *oilseed rape*, M – mieži / *barley*, P – pupas / *field bean*. TA – tradicionālā augsnes apstrāde / conventional tillage; RA – reducētā augsnes apstrāde / reduced tillage; ^{a,b} – ar atšķirīgiem burtiem norādītas būtiskas ($p<0.05$) atšķirības pētīto faktoru ietvaros / ^{a,b} *- significant ($p<0.05$) differences within the studied factors are indicated with different letters*

Augstāko enerģijas ieguvi nodrošināja abi augu maiņā "67% kvieši" iekļautie varianti (216.27 GJ ha^{-1} un 213.23 GJ ha^{-1}) un augu maiņas "25% kvieši" augu kombinācija M-P-K-R (199.17 GJ ha^{-1}).

Ziemas kviešu ražas apjomu visos pētījuma gados bija pozitīvi ietekmējušas lauka pupas kā priekšaugs. Enerģijas ražas īpatsvars no ziemas kviešiem augu maiņā "25% kvieši" bija 35%, sastādot 247 GJ ha^{-1}, kas bija lielākais enerģijas iznākums no ziemas kviešiem starp pētītajiem augu maiņas variantiem. Otrs lielākais īpatsvars augu maiņā "25% kvieši" akumulētajai enerģijai bija ziemas rapsim (28%, vidēji 200 GJ ha^{-1}). Vasaras mieži vidēji četru gadu pētījuma periodā bija akumulējuši gandrīz tik pat daudz enerģijas ražas, cik liela ir to proporcija augu maiņā – 23% (167 GJ ha^{-1}). Lai noteiktu, kurš kultūraugs ir enerģijas ražas ziņā izdevīgākais, nedrīkst aizmirst par priekšauga efektu uz pēcaugu, jo, pateicoties tam, tiek iegūtas augstākas graudu un salmu ražas, kā arī tas rezultējas augstākā pēcauga enerģijas ražā (GJ ha^{-1}).

Organiskā oglekļa uzkrāšanās augsnē

Augsnes organiskā oglekļa saturs būtiski atšķīrās atkarībā no rezultātu iegūšanas gada visos pētītajos augsnes dziļumos ($p<0.001$), bet netika atrasta būtiska augu maiņas vai augsnes apstrādes sistēmas ietekme uz C_{org} saturu pētītajos variantos (skat. 10. tab.).

10. tabula / *Table 10*

Faktoru ietekme (p-vērtība) uz C_{org} saturu dažādos augsnes dziļumos /
Effect of studied factors (p-value) on C_{org} content at different soil depths

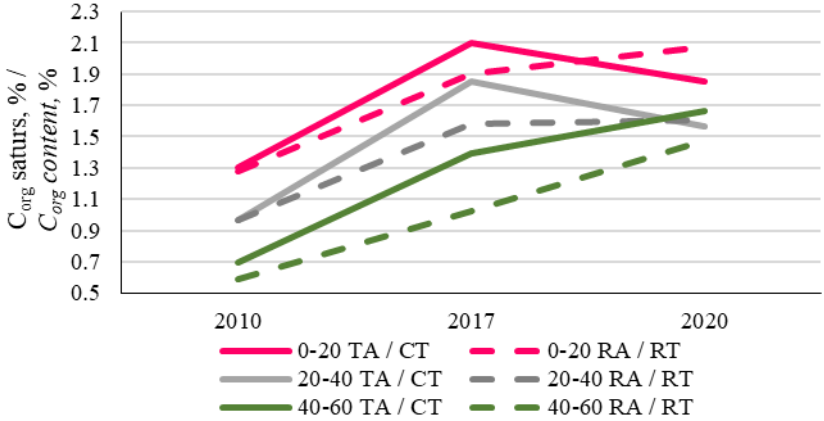
Faktors / *Studied factor*	Augsnes dziļums / *Soil depth*		
	0–20 cm	20–40 cm	40–60 cm
Augsnes apstrades sistēma / *Soil tillage system*	0.969	0.175	0.087
Augu maiņa / *Crop rotation*	0.590	0.313	0.959
Paraugu ņemšanas gads / *Year of sampling*	<0.001	<0.001	<0.001
Gads × augsnes apstrāde / *Year × Soil tillage system*	0.006	-	-

Augsnes C_{org} saturs augsnes aramkārtā (0–20 cm) pētījuma laikā palielinājās, salīdzinot ar oglekļa saturu laikā drīz pēc izmēģinājuma iekārtošanas (izmēģinājumu iekārtoja 2008. g., C_{org} saturu noteica 2010. g.[5]).

Augstāks C_{org} satura pieaugums 0–20 cm dziļumā pēc septiņiem gadiem bija vērojams TA variantā (+0.800%, RA +0.627%), bet pēc 12 gadiem (2022. g.) augstāks C_{org} saturs bija paraugos, kuri ievākti RA variantā (TA +0.557%, RA +0.795%) (skat 10. att.).

Palielinoties augsnes dziļumam, konstatēta C_{org} satura samazināšanās (skat. 10. att.). Vidējais C_{org} saturs 0–20 cm dziļumā visos trīs gados, kad tika ievākti paraugi bija par 19.5% lielāks nekā 20–40 cm dziļumā. Lielāks C_{org} satura pieaugums starp abiem augsnes dziļumiem 2017. un 2022. gadā bija RA variantā (19.6%), bet TA – 13.7%. Organiskā oglekļa satura starpība aramkārtā un dziļākajā augsnes slānī nevienā no variantiem nepārsniedza 1%.

[5] Dati no projekta VPP-5.3.1. (Nr.VP26) "Vietējo lauksaimniecības resursu ilgtspējīga izmantošana paaugstinātas uzturvērtības pārtikas produktu izstrādei" (PĀRTIKA) 3.1. apakšprojekts "Augsnes kā galvenā resursa ilgtspējīga izmantošana drošu un kvalitatīvu pārtikas un lopbarības izejvielu ieguvei no plašāk audzētajām laukaugu sugām"



10. att. **Augsnes C_{org} saturs 2010.[6], 2017. un 2022. gadā tradicionālajā (TA) un reducētajā (RA) augsnes apstrādes sistēmā dažādos augsnes dziļumos /**
Fig. 10. Soil C_{org} content in 2010, 2017 and 2022 in conventional (CT) and reduced (RT) soil treatment systems at different soil depths

Augsnes C_{org} saturs 20–40 cm dziļumā pētījuma laikā no 2010. līdz 2022. gadam palielinājās par 64.7%, sasniedzot vidēji 1.586%, salīdzinot ar C_{org} saturu augsnē 2010. gadā. Salīdzinot augsnes C_{org} saturu atkarībā no augsnes apstrādes sistēmas, augstāks C_{org} pieaugums pēc septiņiem gadiem (2017. gadā) bija vērojams TA variantā – par 0.887%, bet RA variantā par 0.620% (vidējais saturs TA – 1.850%, RA – 1.583%), bet 2022. gadā C_{org} satura starpība RA un TA variantos bija vien 0.04% (TA – 1.566%, RA–1.606%).

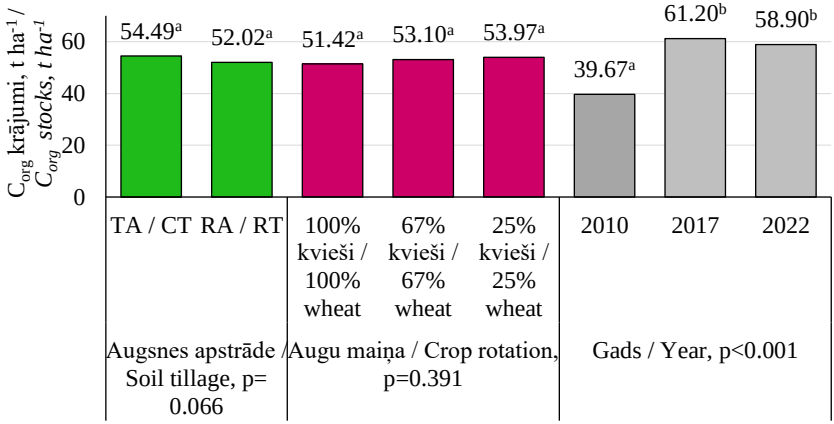
Augsnes organiskā oglekļa vidējais saturs 40–60 cm dziļumā pētījuma laikā no 2010. gada līdz 2022. gadam bija palielinājies par 143.6% no C_{org} 0.644% līdz 1.569%. Augstāks oglekļa satura pieaugums pēc septiņiem un 12 pētījuma gadiem bija vērojams TA variantā (1.389% 2017. gadā, 1.665% 2022. gadā) nekā RA – 1.027% 2017. gadā un 1.473% 2022. gadā. Organiskā oglekļa satura pieaugums periodā no 2010. gada līdz 2017. gadam bija par 86.0%, bet no 2017. gada līdz 2022. gadam tas bija par 30.9%.

Šajā pētījumā divpadsmit gadu periodā (2010.–2022. g.) augsnes dziļumā 0–20 cm netika atrasts būtiskas oglekļa krājumu izmaiņas atkarībā no lietotās augsnes apstrādes sistēmas ($p=0.066$) vai augu maiņas ($p=0.391$) (skat. 11. att.).

Būtisks C_{org} daudzuma pieaugums augsnes virskārtā novērots atkarībā no pētījuma (paraugu ņemšanas) gada ($p<0.001$; 11. att.). C_{org} krājumi 2017. gadā

[6] Dati no projekta VPP-5.3.1. (Nr.VP26) "Vietējo lauksaimniecības resursu ilgtspējīga izmantošana paaugstinātas uzturvērtības pārtikas produktu izstrādei" (PĀRTIKA) 3.1. apakšprojekts "Augsnes kā galvenā resursa ilgtspējīga izmantošana drošu un kvalitatīvu pārtikas un lopbarības izejvielu ieguvei no plašāk audzētajām laukaugu sugām"

bija vidēji 61.20 t ha^{-1}, kas būtiski atšķīrās no 2010. gadā noteiktā C_{org} daudzuma (39.67 t ha^{-1}).



11. att. **Augsnes organiskā oglekļa krājumi augsnes dziļumā 0–20 cm atkarībā no pētītajiem faktoriem, t ha^{-1} /**

Fig. 11. Soil organic carbon stocks at the soil depth of 0–20 cm depending on the studied factors, t ha^{-1}

TA–tradicionālā augsnes apstrādes sistēma; RA–reducētā augsnes apstrādes sistēma / *CT – conventional tillage system; RT – reduced tillage system;* ^{a,b} – ar atšķirīgiem burtiem norādītas būtiskas (p<0.05) atšķirības pētīto faktoru ietvaros / ^{a,b} *– significant (p<0.05) differences within the studied factors are indicated with different letters*

Augsnes C_{org} izmaiņu tendences atkarībā no augsnes dziļuma, iespējams, varētu skaidrot tādējādi, ka C_{org} satura palielinājums dziļākajā slānī (40–60 cm) 2022. gadā vērojams tādēļ, ka tas samazinājies vidējā dziļumā (20–40 cm), kad augsnes daļiņas ar piesaistīto C_{org} varētu būt novietojušās zemākos augsnes slāņos, bet 2018. un 2019. gadā mikrobioloģiskajiem procesiem atstātā augu pēcpļaujas atlieku biomasa bija niecīga, līdz ar to atstājot laukā mazāk nepieciešamo izejvielu C_{org} palielinājumam augsnes slānī 0–20 cm.

Augu maiņu un augsnes apstrādes sistēmu kombināciju ekonomiskais novērtējums

Pētītajās audzēšanas sistēmās (augu maiņu un augsnes apstrādes variantu kombinācijas) ikgadēji atšķīrās iegūtā kultūraugu ražība pētītajos variantos, kā arī pa pētījumu gadiem atšķīrās izdevumi mainīgo izmaksu segšanai un realizējamās produkcijas iepirkuma cenas (skat. 11. tab.), kas bija mainīgas, mainoties tirgus situācijai.

11. tabula / *Table 11*

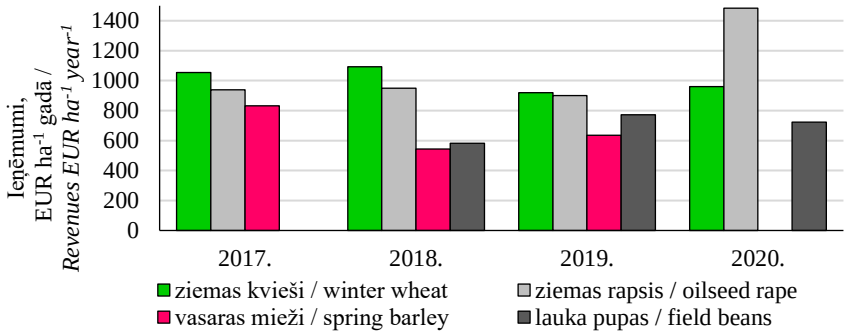
Kultūraugu ražas vidējās iepirkuma cenas 2017.–2020. gadā, EUR t^{-1}

Average purchase prices of crops harvested in 2017–2020, EUR t^{-1}

Realizētā produkcija / *Realized products*	Gads / *Year*			
	2017	2018	2019	2020
Kviešu graudi, pārtikai / *Wheat grain, food quality*	152.00	185.00	162.00	169.00
Kviešu graudi, lopbarībai / *Wheat grain for feed*	134.00	175.00	144.00	151.00
Rapša sēklas / *Oilseed rape seeds*	352.00	351.00	373.00	356.00
Miežu graudi / *Barley grain*	129.00	176.37	133.60	137.00
Lauka pupu sēklas / *Field bean seeds*	200.00	225.00	225.00	220.00

Cenas atbilstoši LLKC bruto segumu aprēķiniem 2017., 2018., 2019. un 2020. gadam / *Prices according to Latvian Rural Advisory and Education Centre gross coverage calculations for 2017, 2018, 2019 and 2020*

Iegūtie graudu/sēklu realizācijas ieņēmumi nozīmīgi atšķīrās atkarībā no audzētā kultūrauga, kā arī atkarībā no pētījuma gadiem (skat. 12. att.). Augstākie ieņēmumi bija no ziemas rapša sēklām 2020. gadā, pārējos pētījuma gados augstākos ieņēmumus veidoja ieņēmumi par ziemas kviešu graudiem, savukārt zemākie ieņēmumi iegūti, realizējot audzēto vasarāju kultūraugu graudus/sēklas.

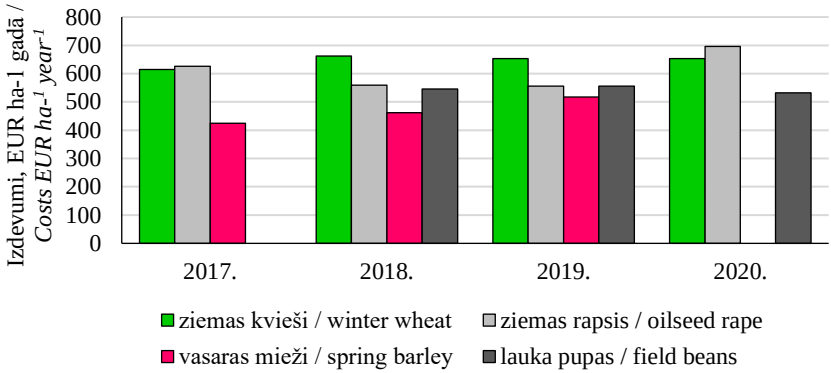


12. att. **Vidējie ieņēmumi gadā, realizējot izmēģinājumā audzēto kultūraugu pamatprodukciju laikā no 2017. līdz 2020. gadam, EUR ha^{-1} /**

Fig. 12. Average annual revenues from the realization of the grain/seed of crops grown in the trial period from 2017 to 2020, EUR ha^{-1}

Analizējot izdevumus (13. att.) izmēģinājuma gados atkarībā no pētītajiem kultūraugiem, secināts, ka izdevumi starp augstāko un zemāko izdevumu līmeni

variēja gan atkarībā no pētījuma gada, gan audzētajiem kultūraugiem. Mazāka ikgadējā izdevumu starpība bija, audzējot lauka pupas – 24 EUR ha^{-1}.

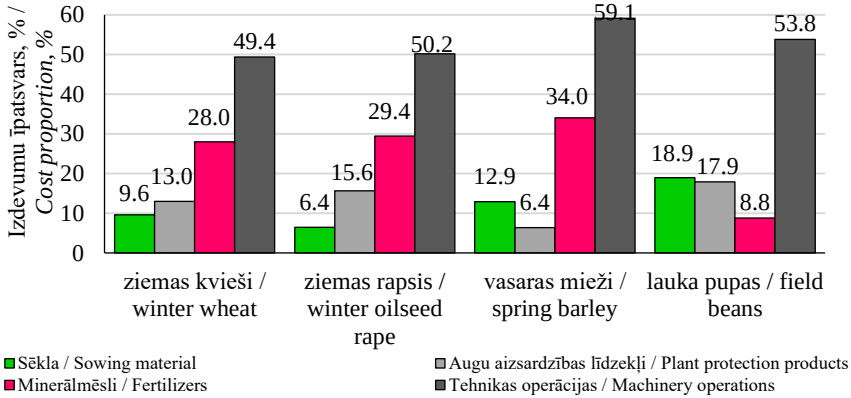


13. att. **Vidējās ražošanas mainīgās izmaksas (EUR ha^{-1}) gadā izmēģinājumā audzētajiem kultūraugiem 2017.–2020. g. /**
Fig. 13. Average annual variable costs for crops grown in the trial period from 2017 to 2020, EUR ha^{-1}

Ziemas kviešu audzēšanas izdevumi atkarībā no pētījuma sezonas variēja no 614 EUR ha^{-1} 2017. gadā līdz 662 EUR ha^{-1} 2018. gadā, un izmaksu pieaugums veidojās, palielinoties izejvielu izmaksām. Lielākā izmaksu starpība bija izmantotajai rapša audzēšanas tehnoloģijai, kura atšķīrās no 556 EUR ha^{-1} 2019. gadā līdz 695 EUR ha^{-1} 2020. gadā, jo 2020. gadā bija nepieciešams vairāk līdzekļus tērēt nezāļu un kaitēkļu ierobežošanai, turklāt tika izmantots arī ārpussakņu mēslojums, kas kopumā sadārdzināja izmaksas, bet tās attaisnojās ar augstāku ražību un augstākiem ieņēmumiem.

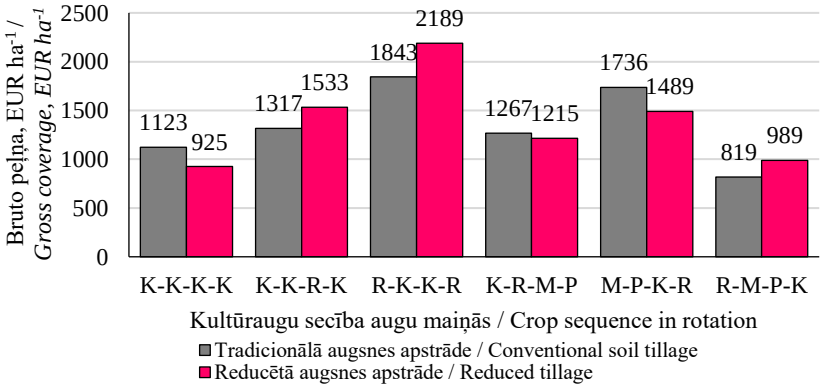
Izdevumi atkarībā no salīdzinātajām audzēšanas sistēmām katrā gadā katra kultūrauga audzēšanas tehnoloģijā atšķīrās tikai pozīcijā "tehnikas operācijas", jo pētīja atšķirīgas augsnes apstrādes sistēmas: tradicionālo un reducēto augsnes apstrādi.

Tehnikas operāciju izmaksas visu kultūraugu audzēšanas tehnoloģijās veidoja proporcionāli lielākās izmaksas (14. att.). Lielākā cenu atšķirība starp augsnes apstrādes variantiem bija 2017. gadā, kad RA variants bija par 9.50 EUR ha^{-1} izdevīgāks nekā TA, bet 2020. gadā TA variants bija par 3.67 EUR ha^{-1} izdevīgāks nekā RA. Mazās starpības starp augsnes apstrādes variantiem saistītas ar to, ka RA variantā lietotā augsnes lobīšana tikai veikta divas reizes, un pēc tās sekoja tāda pati augsnes pirmssējas apstrāde kā TA variantā pēc aršanas. Nepieciešamība pēc augsnes dubultas lobīšanas skaidrojama ar augsnes granulometrisko sastāvu – putekļu mālu, kurš ir smags ar smalkām augsnes daļiņām, kuras var veidot rupju augsnes struktūru, līdz ar to, lai to vienmērīgi sastrādātu, nepieciešami vairāki lobīšanas gājieni.



14. att. **Izdevumu grupu īpatsvars (%) kopējās ražošanas mainīgajās izmaksās ziemas kviešiem, ziemas rapsim, vasaras miežiem, lauka pupām /**
Fig. 14. Proportion of cost groups (%) in total production variable costs for winter wheat, winter oilseed rape, spring barley, field beans

Augu maiņu novērtējumā četru gadu periodā atbilstoši katrā variantā audzētajiem kultūraugiem, augstākais ekonomiskais izdevīgums pēc bruto seguma aprēķina uz vienu hektāru (skat. 15. att.) bija augu maiņai "67% kvieši" reducētās augsnes apstrādes sistēmā ar augu secību rapsis–kvieši–kvieši–rapsis, kurai bruto segums pētījuma periodā bija 2189 EUR ha^{-1}.



15. att. **Augu maiņu un augsnes apstrādes variantu iespējamā bruto peļņa EUR ha^{-1} četru gadu periodā (2017.–2020. g.) /**
Fig. 15. Potential gross coverage depending on crop rotation and tillage in EUR ha^{-1} over a four-year period (2017–2020)
K – ziemas kvieši / *winter wheat*, R – ziemas rapsis / *oilseed rape*, M – vasaras mieži / *spring barley*, P – lauka pupas / *field beans*

Otrais ienesīgākais variants bija tās pašas augu maiņas un augu secības variants tradicionālā augsnes apstrādes sistēmā (1843 EUR ha^{-1}), bet trešais – augu maiņa "25% kvieši" ar kultūraugu secību mieži–lauka pupas–kvieši–rapsis tradicionālā augsnes apstrādes sistēmā (1736 EUR ha^{-1}).

Mazāk ienesīgie varianti bija augu maiņa "25% kvieši" ar kultūraugu secību rapsis–mieži–lauka pupas–kvieši tradicionālā augsnes apstrādes sistēmā, kurā četru gadu bruto peļņa (EUR ha^{-1}) veidoja tikai 819 EUR, kas bija par 2.67 reizēm mazāk nekā ekonomiski izdevīgākajā variantā (2189 EUR ha^{-1}, augu maiņā "67% kvieši", RA, R-K-K-R). Ekonomiski neizdevīgākie augu maiņu varianti, ja vērtē vidējo bruto segumu atkarībā no abiem augsnes apstrādes variantiem, bija augu maiņa "25% kvieši" ar kultūraugu secību rapsis–mieži–pupas–kvieši (vidēji 904 EUR ha^{-1}), augu maiņa "100% kvieši" (vidēji 1024 EUR ha^{-1}) un augu maiņa "25% kvieši" ar kultūraugu secību kvieši–rapsis–mieži–pupas (1241 EUR ha^{-1}).

Ieguvumi no pākšaugu iekļaušanas augu maiņās ir jāvērtē no vairākiem aspektiem, un dažādos pasaules reģionos lielākie ieguvumi būs atšķirīgi. Piemēram, iekļaujot pākšaugus augu maiņā, mazinās kopējais nepieciešamais slāpekļa mēslojuma patēriņš, kas attiecas gan uz iespēju nelietot slāpekli platībās, kur audzē pākšaugus, gan arī uz slāpekļa normas samazināšanas iespēju pēcaugam. Augu maiņas ar iekļautiem pākšaugiem nodrošina arī vairāk sagremojamo olbaltumvielu mājlopu barības devām ar zemāku ietekmi uz vidi, salīdzinot ar tradicionālām labību augu maiņām. Tomēr atsevišķos pētījumu gados no augu maiņām, kurās iekļauti pākšaugi, tomēr neizdodas sasniegt pietiekamu mājlopiem piegādāto apmaiņas enerģiju, salīdzinot ar labību–eļļas augu un labību–labību augu maiņām.

SECINĀJUMI

1. Lai arī ziemas kviešu augšana un attīstība nebija atkarīga no pētītajiem augu maiņas variantiem ne rudens, ne vasaras veģetācijas periodos, tomēr ziemas kviešu dīgšanas sākums un temps bija atšķirīgs atkarībā no pētītās augsnes apstrādes sistēmas. Priekšrocības, pateicoties atšķirīgam nokrišņu nodrošinājumam pētījuma gados, bija gan vienai, gan otrai augsnes apstrādes sistēmai, tomēr būtiskas atšķirības laukdīdzībā novēroja tikai ekstremāli sausajā 2018. g., kas parādīja reducētās augsnes apstrādes priekšrocības ziemas kviešu dīgšanas nodrošināšanā. (1. uzdevums, 1. tēze)
2. Vidējās ziemas kviešu graudu un salmu ražas bija līdzvērtīga tradicionālā un reducētā augsnes apstrādes sistēmā (apstiprinās otrā hipotēze), un būtiski augstākas kviešu vidējās ražas iegūtas augu maiņās "67% kvieši" un "25% kvieši", salīdzinot ar kviešu bezmaiņas sējumiem (apstiprinās daļa pirmās hipotēzes). Ziemas kviešu ražas, audzējot tos pēc lauka pupām un rapša, bija augstākas, izmantojot reducēto augsnes apstrādi, bet kviešu bezmaiņas sējumos trijos no četriem pētījuma gadiem – tradicionālās augsnes apstrādes variantā. (1. tēze)
3. Ziemas kviešu ražas struktūrelementu vidējās vērtības nebija būtiski atšķirīgas atkarībā no augsnes apstrādes sistēmām, bet tās ietekmēja pētījuma gados pastāvošie meteoroloģiskie apstākļi un atsevišķus – priekšaugs augu maiņā. Būtiski atšķirīga bija vidējā 1000 graudu masa atkarībā no priekšauga augu maiņā, un augstākā tā bija augu maiņas variantā "25% kvieši", kur ziemas kviešu priekšaugs bija pupas. Produktīvo stiebru skaits un graudu skaits vārpā nevienā no pētījuma gadiem nebija būtiski atšķirīgi atkarībā no priekšaugiem augu maiņas variantos. (1. tēze)
4. Ziemas kviešu graudu kvalitātes rādītāju (proteīna saturs, lipekļa saturs, Zeleny indekss, krišanas skaitlis, tilpummasa) vidējās vērtības nebija atkarīgas no pētītās augsnes apstrādes sistēmas vai augu maiņas varianta, bet būtisks bija ziemas kviešu priekšauga efekts uz lipekļa saturu un Zeleny indeksu, un augstāki tie bija, ja kviešus audzēja pēc lauka pupām. Visiem kvalitātes rādītājiem novērotas būtiskas vidējo rādītāju atšķirības pētījuma gados. Lielākā ietekme uz kvalitātes veidošanos bija konkrēto gadu meteoroloģiskajai situācijai. (1. tēze)
5. Ziemas rapša un vasaras miežu ražas izmēģinājumā bija līdzvērtīgas abās augsnes apstrādes sistēmās, savukārt lauka pupu vidējā raža bija nedaudz, bet būtiski augstāka tradicionālās augsnes apstrādes sistēmā. (2. tēze)
6. Enerģētiski produktīvākie augu maiņās iekļautie kultūraugi bija ziemas kvieši (212.43 GJ ha^{-1}) un ziemas rapsis (209.99 GJ ha^{-1}). Enerģijas ražas būtiski atšķīrās atkarībā no pētītajiem augu maiņu variantiem, bet atšķirības atkarībā no pētītā augsnes apstrādes varianta nebija būtiskas. Augstāko enerģijas ražu (GJ ha^{-1}) no pētītajiem augu maiņas variantiem nodrošināja augu maiņa "67% kvieši", bet augu maiņa "25% kviešu" nodrošināja līdzvērtīgu enerģijas ieguvi bezmaiņas kviešu sējumu variantam (100% kvieši"), kas pētījuma

gados bija saistīts ar zemajām vasarāju ražām sausajā 2018. un 2019. gadā. Tādējādi hipotēzi par augstākas enerģijas ražas ieguvi, samazinot kviešu īpatsvaru augu maiņā, četru gadu periodā neizdevās pierādīt. Daļēji apstiprinās 1. hipotēze, ka, samazinot kviešu īpatsvaru augu maiņā, pieaug augu maiņā akumulētās enerģijas daudzums. (3. tēze)

7. Augsnē uzkrātā organiskā oglekļa saturs divpadsmit gadu periodā (2010.–2022. g.) bija būtiski pieaudzis visos pētītajos augsnes dziļumos (0–20 cm, 20–40 cm, 40–60 cm), bet pētījumu periodā to būtiski neietekmēja ne pētītais augu maiņas, ne augsnes apstrādes variants. Augsnes organiskā oglekļa saturs bija atšķirīgs dažādos augsnes dziļumos. Augsnes apstrādes sistēmai un augu maiņai uz kopējiem oglekļa krājumiem augsnē 0–20 cm dziļumā būtiskas ietekme netika konstatēta. (4.tēze)
8. Augstāku bruto segumu nodrošināja augu maiņas varianti ar diviem un vairākiem kultūraugiem salīdzinājumā ar ilgstošiem bezmaiņas sējumiem. Pētījuma periodā ekonomiski visizdevīgākā bija augu maiņa “67% kvieši”, izmantojot reducēto augsnes apstrādi, kurai sekoja augu maiņa “25% kvieši”, izmantojot abus augsnes apstrādes variantus. Ekonomisko rezultātu pa gadiem ietekmēja gan mainīgās izejmateriālu cenas, gan mainīgās kultūraugu ražas. Hipotēze, ka kviešu audzēšana dažādotā augu maiņā ekonomiski attaisnojas, daļēji pierādīta. (5. tēze)

PATEICĪBAS

Pētījums veikts, pateicoties vairāku projektu finansējumam:

1) VPP AgroBioRes "Lauksaimniecības resursi ilgtspējīgai kvalitatīvas un veselīgas pārtikas ražošanai Latvijā", 1. daļa Augsne "Augsnes ilgtspējīga izmantošana un mēslošanas risku mazināšana";
2) LR Zemkopības ministrijas subsīdijas, projekts "Minimālās augsnes apstrādes ietekme uz augsnes auglības saglabāšanu, kaitīgo organismu attīstību un izplatību, ražu un tās kvalitāti bezmaiņas sējumos";
3) Latvijas Biozinātņu un tehnoloģiju universitātes pētniecības programma "Zinātnes kapacitātes stiprināšana LBTU". Projekts Nr. Z33 "Augsekas produktivitāte atkarībā no ziemas kviešu īpatsvara tajā un augsnes apstrādes paņēmiena". Līguma Nr. 3.2-10/2019/LLU/138;
4) ESF projekts ES32 – "LLU pāreja uz jauno doktorantūras finansēšanas modeli".

Izsaku personīgu pateicību:

- profesoram, Dr. habil. agr. Antonam Ružam par vērtīgiem padomiem doktora darba izstrādē un paldies par iespēju darboties A. Ružas vadītajā projektā Valsts pētījumu programmā;
- profesorei, Dr. biol. Birutai Bankinai par iespēju pievienoties projektam "Minimālās augsnes apstrādes ietekme uz augsnes auglības saglabāšanu, kaitīgo organismu attīstību un izplatību, ražu un tās kvalitāti bezmaiņas sējumos", par finansējumu projekta veikšanai, par iespēju ziņot projekta rezultātus starptautiskās konferencēs, kā arī par padomiem un sarunām promocijas darba izstrādes laikā;
- Dr.sc.ing. Jānim Rižikovam, Valsts Koksnes ķīmijas institūta vadošajam pētniekam, par sadarbību sadegšanas siltuma (biomasas enerģētiskās vērtības) noteikšanā, kā arī par konsultācijām enerģētiskās vērtības izmantošanai;
- Kristapam Vītolam, Latvijas Lauku konsultāciju centra bruto segumu ekspertam, par palīdzību vidējo izcenojumu sagatavošanā augu aizsardzības un mēslošanas līdzekļiem, kuri tika izmantoti bruto segumu sagatavošanā;
- LBTU LPTF (agrāk LLU LF) MPS "Pēterlauki" kolektīvam laika periodā no 2016.–2020. gadam, jo īpaši darbiniecēm Mg. agr. Lindai Litkei un Mg. agr. Ievai Plūdumai-Pauniņai par izmēģinājuma regulāru apsekošanu un palīdzību datu ieguvē, Mg. agr. Merabam Katamadzem par agronomiskajiem risinājumiem izmēģinājuma laukos;
- profesoram, Dr. habil. agr. Aldim Kārkliņam par konsultācijām un skaidrojumiem par organiskā oglekļa veidošanos un uzkrāšanos augsnē, kā arī padomiem literatūras izpētē un iegūto datu aprakstīšanā;

– kolēģei Mg. agr. Ievai Erdbergai par veltīto laiku konsultācijām saistībā ar augsnes organisko oglekli;
– profesorei, Dr. oec. Ainai Dobelei par vērtīgiem padomiem rezultātu ekonomiskās nozīmes novērtēšanā;
– LPKS "Latraps" darbiniekiem, īpaši Līgai Ružai, Edītei Konivālei un Gintai Briedei par palīdzību ar informācijas iegūšanu par augu aizsardzības līdzekļu un minerālmēslojuma cenām;
– docentei, Dr. agr. Gundegai Putniecei par konsultācijām laukkopības terminu lietošanā;
– docentei, Ph. D. Sarmītei Rancānei par palīdzību zinātnisko avotu meklēšanā par ilggadīgo augu maiņu stacionāru Skrīveros;
– profesorei, Dr. math. Natālijai Sergejevai, doktorantūras skolas vadītājai par atbalstu, ieteikumiem un motivēšanu projekta īstenošanas gaitā;
– manai kolēģei un tiešajai darba vadītājai Lauksaimniecības fakultātes dekanātā, asociētajai profesorei, Dr. agr. Dacei Siliņai par iecietību un morālo atbalstu laikā, kad, pildot darba pienākumus, gatavoju promocijas darbu, paldies par motivēšanu, padomiem, uzticību;
– profesorei, Dr. agr. Gunitai Bimšteinei par ieteikumiem valodas uzlabošanai darbā un padomiem;
– kolēģei, Ph.D. Agritai Švartai par padomiem un motivēšanu promocijas darba izstrādes nobeiguma posmā;
– asoc. prof., Ph.D. Kristapam Kļaviņam par padomiem un palīdzību angļu valodas tulkojumiem;
– absolventiem Reinim Lazdānam, Kristapam Lisovskim, Kristapam Zemītim, Edgaram Bajinskim par dalību izmēģinājumu datu iegūšanā.
– Marikai Reihai, latviešu valodas skolotājai, manai tantei, par latviešu valodas rediģēšanu promocijas darbā un kopsavilkumā;
– draugam Sandim par atbalstu un rūpīgu iedziļināšanos darba noformēšanā;
– ģimenei, radiem, draugiem, kuri atbalstīja, palīdzēja ar bērnu pieskatīšanu un arī atsevišķu datu ievākšanā, kā arī juta līdzi un motivēja.

♥ Vislielākā pateicība maniem vecākiem **Inārai un Guntaram Misuļiem,** māsām **Alisei un Agatei,** manām mīļajām meitiņām **Laurai un Dārtai** un viņu tētim **Armandam Dargužim** un par pacietību un atbalstu vairāk nekā sešu gadu garumā, lai šis darbs taptu!

INTRODUCTION

The growing global population creates challenges for the food and energy industries and other basic needs. Land, soil, and water resources are scarce and vulnerable to climate change. Agriculture with existing resources requires higher crop productivity. In order to evaluate the possibilities of sustainable crop production, it is necessary to evaluate the benefits and investments of cultivation of crops over a period of longer than one year in the cycle of crop rotation. A one-season data evaluation of crop growth is not enough.

The productivity of crops and the profitability of cultivation can be influenced by simple agronomic practices such as crop rotation and the soil tillage system, which are largely replaced by synthetic fertilizers and plant protection products. In Latvia, the most recent studies comparing the productivity of different crop rotations, including soil tillage systems, were carried out in the late 20th century (1986–2002). Due to changing cultivation technologies and trends in the world and taking into account global climate change, it is necessary to study the impact of crop rotation and soil tillage on crop productivity within the species and within the crop rotation cycle. As different species are included in crop rotation, the comparison in tonnes (t ha^{-1}) is not sufficiently objective, so the energy yield from biomass (GJ ha^{-1}) or gross coverage (EUR ha^{-1}) can be used. It is also essential to study the impact of soil tillage and crop rotation on the possibilities of increasing soil organic carbon stocks under Latvian conditions to address the problem of global climate change. Changes in soil organic carbon content are observed in the long term, so comparing the amount of carbon in the soil in a long-term trial is essential.

Hypotheses of the research

1. Reducing the share of winter wheat in crop rotation improves the productivity of winter wheat (t ha^{-1}), increases the total energy yield of crop rotation (GJ ha^{-1}), and the production of winter wheat is more profitable in long term (EUR ha ^{1}).
2. Conventional and reduced soil tillage ensure equivalent winter wheat yields.

The aim of the thesis

To determine the productivity of crop rotation depending on the proportion of winter wheat in it and the applied tillage system.

Research tasks

1. Assess the growth and development of winter wheat depending on crop rotation and soil tillage system.
2. Determine the winter wheat yield and the formation of its components depending on crop rotation and tillage system.
3. Evaluate the quality of the winter wheat yield depending on the studied factors.

4. Assess the productivity of other crops included in crop rotations in two tillage systems.
5. Determine the influence of studied factors on energy yield of winter wheat and other crops included in the crop rotations and the total energy yield of the crop rotation.
6. Evaluate the accumulation of soil organic carbon depending on the investigated factors.
7. Calculate and analyse the economic benefit of crop rotation depending on the proportion of wheat in it and the tillage system.

Thesis to be defended

1. Winter wheat yields are increased by diversifying crop rotation; in conventional and reduced tillage systems, wheat development and the yield component formation are equivalent, and equivalent yields can be obtained.
2. Conventional and reduced tillage systems mainly provide equivalent seed yield within the species for winter oilseed rape, spring barley and field beans.
3. Diversification of a crop rotation can provide a higher energy yield, but the effect of field crops included in the crop rotation on the total energy yield depends on the meteorological conditions during the evaluation period.
4. In the long term, leaving post-harvest residues on the field can increase soil organic carbon content, regardless of the soil tillage or crop rotation options studied.
5. The reduction in the depth of soil tillage in the soil of heavy dusty clay is financially insignificant. However, the diversification of plants into crop rotation may lead to higher gross coverage.

The novelty of the research: a complex study has not been carried out in Latvia so far, evaluating several crop rotation and two soil tillage systems in a stationary, multi-year (8–10) trial to explain the benefits (yield, energy yield, economic benefit, soil carbon accumulation) from the diversification of crops in crop rotation compared to repeated wheat sowing. The study provides an opportunity to conclude how productive it is to sow winter wheat in repeated sowings under Latvian conditions and assess the impact of different soil tillage systems on their productivity indicators. Long term studies on the effects of crop rotation and soil tillage systems on soil carbon accumulation still need to be completed in Latvia conditions.

Co-financing of the development of the promotion work has been received within the framework of four projects.

1) National Research Programme AgroBioRes “Agricultural resources for sustainable production of high quality and healthy food in Latvia”, Part 1 “SOIL, sustainable use of soil and reduction of fertilization risks”;

2) Subsidies of the Ministry of Agriculture of the Republic of Latvia, project "Influence of minimal soil tillage on its fertility maintenance, development and distribution of pests as well as crops' yield and quality in resowings";
3) Research programme of Latvia University of Life Sciences and Technologies "Strenghtening science capacity of Latvia University of Life Sciences and Technologies" Project No. Z33 "Productivity of crop rotation depending on winter wheat proportion in it and soil tillage method";
4) European Social Fund project No.8.2.2.0/20/I/001 "LLU Transition to a new funding model of doctoral studies".

Approbation of Thesis results

Four publications indexed to SCOPUS and/or Web of Science databases have been prepared based on the study results; nine publications in other collections of seminar and conference abstracts or articles have been prepared. Five oral presentations and six poster reports on research results were given at conferences and scientific seminars.

Publications indexed in Scopus and/or Web of Science databases

1. Darguza[7] M. Gaile Z. (2023). Productivity of crop rotation depending on included plants and soil tillage. *Agriculture*. 13, Article No. 1751. DOI:103390/Agriculture13091751.
2. Darguza[1] M., Gaile Z. (2020). The Effect of Crop Rotation and Soil Tillage on Winter Wheat Yield. ***In****: "Research for Rural Development 2020",* Annual 26th International Scientific Conference Proceedings (13–15 May, 2020), Vol. 35. Jelgava: LLU, p. 14–21. DOI: 10.22616/rrd.26.2020.002.
3. Darguza[1] M., Gaile Z. (2019). Yield and Quality of Winter Wheat, Depending on Crop Rotation and Soil Tillage. ***In****: "Research for Rural Development 2019",* Annual 25th International Scientific Conference Proceedings (15–17 May, 2019). Jelgava: LLU, Vol. 2, p. 29–35. DOI: 10.22616/rrd.25.2019.045.
4. Darguža[1] M., Gaile Z. (2018). Productivity of crop rotation measured as energy produced by included plants: a review. ***In****: "Research for Rural Development 2018"* Annual 24th International Scientific Conference Proceedings (16–18 May, 2018). Jelgava: LLU, Vol. 2, p. 20–27. DOI: 10.22616/rrd.24.2018.046.

[7] Author's surname was changed from Darguza uz Misule

MATERIALS AND METHODS

Crop productivity was evaluated depending on crop rotation and tillage system. The comparison of the yield of the species included in the crop rotation in tons (t ha^{-1}) is not objective enough, so the energy yields accumulated in biomass (GJ ha^{-1}) and gross coverage (EUR ha^{-1}) were used for comparison. The study compared changes in soil organic carbon (C_{org}) content and stocks depending on tillage system and crop rotation (Fig. 1).

Description of the study site

Field trials have been conducted at the LLU LF (now LBTU LPTF) Research and study farm "Pēterlauki" study site "Poķi" (56°30.658′ Z and 23°41.580′ A) in a two-factorial trial stationary with two soil tillage systems and three different crop rotations. Trials started in 2009 with a total area 6 ha. The research on plants as part of the promotion work has been carried out over four growing seasons from 2016/2017 to 2019/2020 to cover the entire cycle of full crop rotation. The research used soil analysis data from 2010[8], 2017 and 2022; The data of 2010 were used to compare the initial state with the results of 2017 and 2022.

The research was installed in soil with the granulometric composition silt. According to the international soil classification, the soil was *Cambic Calcisol*. Agrochemical analyses of soil (0–20 cm layer) were carried out in 2017: soil reaction pH_{KCl} 6.7, organic matter content high – 3.5%, plant available phosphorus (P_2O_5) supply medium – 125.9 mg kg^{-1}, potassium (K_2O) high – 233.0 mg kg^{-1}.

Variants of field experiment

The researched factors:

A – the soil tillage system;

B – crop rotation;

C – vegetation season (annual agro-meteorological conditions of the study)

[8] Data from project VPP-5.3.1. (Nr.VP26) ""Sustainable use of local agricultural resources for the development of food products with increased nutritional value" (FOOD) 3.1. sub-project "Sustainable use of soil as the main resource for the production of safe and high-quality food and fodder raw materials from widely cultivated field plant species"

Soil tillage systems

A1: conventional soil tillage with mould-board ploughing at a depth to 24 cm; as well as pre-sowing tillage with a cultivator at a depth of 4–5 cm (hereinafter – CT);

A2: reduced soil tillage with soil disc harrowing at a depth to 8–10 cm twice and pre-sowing treatment with a cultivator at a depth of 4–5 cm (hereinafter – RT).

Primary soil tillage for all crops was carried out in autumn.

Crop rotations differed in terms of crops included and the length of rotation, and the proportion of winter wheat (*Triticum aestivum*) in them. Each crop rotation was implemented in both soil tillage options studied.

B1: winter wheat in repeated sowings with a 100% share of wheat from 2009 (hereinafter – "100% wheat", also W–W).

B2: the duration of the crop rotation was three years, and the proportion of wheat in it was 67%, including winter oilseed rape once every three years (hereinafter – "67% wheat"). Crop sequence: oilseed rape (*Brassica napus* ssp. *oleifera*)–wheat–wheat (OR–W–W). Two of the three crops included in the rotation were studied each year at the experimental site. In this crop rotation, wheat forecrops were oilseed rape and wheat (after oilseed rape – hereinafter or-wheat).

B3: crop rotation over four years, included four different crops in sequence field beans (*Vicia faba)* –winter wheat–winter oilseed rape–spring barley (*Hordeum vulgare*) (FB–W–OR–SB). The proportion of winter wheat in this crop rotation was 25% (hereinafter – "25% wheat"). Each year, three of the four crops included in the rotation were studied, growing them in the rotational sequence of plants.

The trial was started in autumn 2016 at the trial site, where 12 variants had been arranged in four replications. The trial was arranged in two field blocks (see Figure 2 for a stationary plan), each with 12 plots (24 in total), and each trial plot was divided in half (I and II) for four replications. The size of one plot in the block was 0.25 ha (100 m × 25 m), when divided in half – 0.125 ha plots were obtained.

Vegetation season: the trial was conducted for four seasons: C1 – 2016/2017, C2 – 2017/2018, C3 – 2018/2019 and C4 – 2019/2020 vegetation seasons.

Agrotechnics in the trial

The pre-crops and the soil tillage system for the crops covered by the study were applied according the trial scheme and rotation plan for 2016–2020 (see Figure 2).

Winter wheat was sown at optimum term in 2016 (19 September), 2018 (6 September) and 2019 (10 September), but sowing time was delayed in 2017 (30 September) due to a high amount of precipitation which disturbed the

soil treatment. Sowing rates used were 500 germinable seeds per m^2, except in 2018/2019 (450 seeds per m^2) because the sowing term was at the beginning of September. Seeds were treated with fungicide. Bread baking quality varieties were sown ('Zentos' harvested in 2017 and 'Skagen' in the other years). Complex fertiliser was spread before sowing (N 25 kg ha^{-1}, P_2O_5 65 kg ha^{-1}, K_2O 40–65 kg ha^{-1}). Nitrogen top-dressing rates in spring were 172 kg ha^{-1} in 2017, and 155 kg ha^{-1} in 2018, 2019 and 2020 using ammonium nitrate split in two portions (first at GS 23–29, second at GS 31–32, according to BBCH). Foliar fertilisers were also used. Herbicide was used each spring (GS 31). Two plant growth regulators were used in each trial year before GS 31 and at GS 37. Fungicide treatment was carried out each year at heading (GS 51–55). The necessity for insecticide treatment was only in summer 2018 (GS 55).

Oilseed rape were sown in all trial years, and grown on two of four crop rotation variants: "67% wheat" in 2017, 2019 and 2020, and in rotation "25% wheat" in 2017, 2018 and 2020. Basic fertilisation was performed before sowing using complex fertiliser with a low nitrogen proportion (N 18–23 kg ha^{-1}, P_2O_5 50–65 kg ha^{-1}, and K_2O 60–70 kg ha^{-1}). The nitrogen rate at top-dressing was used depending on yield potential (172 kg ha^{-1} in 2017; 152 kg ha^{-1} in 2018 and 2019; 197 kg ha^{-1} and 48 kg ha^{-1} of sulfur in 2020 (first at GS 23–29, second at GS 32–35)). The sowing rate was 80 germinable seeds m^{-2}, using hybrid varieties at the following times: 28 August 2016 ('Veritas CL'), 18 August 2017 ('Visby'), 17 August 2018 ('Visby'), and 19 August 2019 ('KWS Hymalaya CL'). Crop protection consisted of weed control with herbicides each year in autumn, and in addition herbicide was applied in spring 2017, 2019, and 2020 (GS 31–33). Plant growth regulator was used in autumn in the first three trial years (GS 14–16). Insecticide was used every year at least once, but in 2020 insecticide was used three times (during flowering, GS 60–69). Foliar fertilisers with boron were used in 2017, 2019 and 2020.

Spring barley was sown in crop rotation "25% wheat" in three of the four research years: 2017, 2018 and 2019. The sowing rate was 450 germinable seeds per m^2. The sowing term was in the third ten-day period of April. The variety 'Tocada' was used. The total nitrogen rate in 2017 was 99 kg ha^{-1}, in 2018 it was 107 kg ha^{-1}, and in 2019 it was 92 kg ha^{-1}. Basic fertilisation was performed before sowing using complex fertiliser (N 38 kg ha^{-1}, P_2O_5 38 kg ha^{-1}, and K_2O 38 kg ha^{-1}). Top-dressing with nitrogen (N 54–67 kg ha^{-1}) was completed at the tillering stage (GS 21–23). Weed control was achieved using herbicide once in spring, fungicide was applied in two years (2017 and 2019) at GS 45–49 and insecticide was applied in 2019 at the heading stage (GS 55).

Field beans were sown in crop rotation "25% wheat" in 2018, 2019 and 2020 with a rate of 45 germinable seeds per m^2. The variety 'Laura' was used. Sowing time was optimal in 2019 (6 April) and 2020 (30 March), but delayed in 2018 (24 April) because of soil moisture conditions in spring which did not allow earlier sowing. Basic fertilisation was performed during sowing time using monoammonium phosphate in 2018 (N 14 kg ha^{-1}, P_2O_5 62 kg ha^{-1}) and complex

fertiliser was applied in 2019 and 2020 (N 30 kg ha^{-1}, P_2O_5 30 kg ha^{-1}, K_2O 30 kg ha^{-1}). For weed control, herbicides were used (three sprays in 2018 and 2019 because of the long field germination period, and two in 2020). Insects were controlled once during the flowering stage (GS 61–65) each year.

Observations and analyses performed

Germination dynamics for winter wheat were listed in three of the four years of the study: 2017, 2018, and 2019. The counting of germination dynamics started from the onset of the first sprouts and continued every 2 to 3 days in the first week until the number of sprouts was constant or tillering began. The number of records during the study years varied due to differences in the rate and evenness of sprouting over the years. The measurements was carried out using a 0.1 m^2 frame with three measurements per each replication. At first measurement, randomly selected counting sites were accurately pegged and they were constant throughout each year's counting period.

The germination dynamics depending on the two soil tillage systems has been compared over the five measurements and the last field germination measurement, calculating the increase within each period (%).

Winter wheat field germination (%) was calculated according to formula (1), taking the data of germinated sprouts from the last counting.

The growth and development of the studied crops were recorded according to the BBCH scale. For winter wheat, the **length of the vegetation period** was determined, calculated in days from January 1 to 89 AE (fully ripe). The **winter hardiness** and **lodging resistance** of winter wheat were determined on a 9-point scale (where: 9 – highest evaluation, 1 – lowest evaluation)[9].

Determination of the yield components was made by sample sheaf analysis**.** Sampling for winter wheat, spring barley, field beans and winter oilseed rape was done at GS 89. Samples of winter wheat and spring barley were taken from the area of 0.125 m^2 in three places in each plot. For winter oilseed rape and field beans, the sample sheafs were gathered from an area of 0.5 m^2 in two places in each plot. Yield components were determined for:

- winter wheat and spring barley: productive spikes m^{-2}; number of grain per spike;
- winter oilseed rape: number of plants per 1 m^2;
- field beans: the number of plants per 1 m^2; the number of pods per plant, pieces; the number of seeds per pod, pieces.

[9] *Regulations Regarding the Assessment of Value for the Cultivation and Use of Plant Variety*. Republic of Latvia Cabinet Regulation No. 518. [Tiešsaiste] [skatīts 01.02.2023.]. Pieejams: https://likumi.lv/ta/id/250577-augu-skirnes-saimniecisko-ipasibu-novertesanas-noteikumi.

Weight of 1000 grains/seeds was determined according to the standard method (LVS EN ISO 520:2011) using seed counter Pfeuffer Contador and an electronic balance.

Grain/seed yields for winter wheat, spring barley, and field beans were obtained by direct yield accounting (harvesting by combine) and recalculating at 100% purity and standard humidity (14%). The counting area of the harvested field varied by year and averaged between 100 m^2 and 120 m^2. For winter oilseed rape, the yield was calculated using the indirect yield accounting method from sample sheafs and recalculating average seed mass into t ha^{-1} at 100% purity and 8% moisture.

Straw yields were calculated from a sample sheaf analysed in combination with the detected grain/seed yield (formula (2)).

Harvest index expressing the percentage of grain mass in total aboveground biomass was calculated.

Grain and seed quality indicators were determinated at the LLU LF (now LBTU LTPF) grain and seed study–scientific laboratory. The quality indicators for the crops studied using near-infrared spectroscopy (NIRS) with analyzers Infratec Analyzer 1241 (2017) and Infratec ™ NOVA (from 2018) are summarised in Table 1.

Falling number (s) for winter wheat was determined by the Hagberg-Perten method (ISO 3093: 2009). For field beans the volume weight was determined according to the standard method LVS 273 using cylinders and scales. The quality of the obtained grains and seeds was compared with the quality requirements of Agricultural Services Cooperative Society "Latraps" (hereinafter – "Latraps"). The protein and gluten content, volume weight, and falling number evaluated for the relevance of winter wheat grains to one of the quality groups (food or feed). A feed group was suitable for field beans. In the case of spring barley, the volume weight was evaluated in the procurement, and it was to be above 60 kg hL^{-1}. The purchase of oilseed rape corresponded with a base oil content of 40%.

Crop energy yields. The energy values (kJ kg^{-1}) of crop seeds and post-harvest residues included in the trial were determined at the Latvian State Institute of Wood Chemistry using the standard method (EN ISO 18125: 2017). The energy value was determined for each variant's average sample of four replicates. Crop energy yields (kJ ha^{-1}, recalculated in GJ ha^{-1}) were calculated according to formula (3), separately calculating the energy yields from grain/seed and crop post-harvest residues. To determine the total energy yield from 1 ha, the sum of the energy yield of the primary production and of the post-harvest residues were counted (kJ ha^{-1} or GJ ha^{-1}).

To compare the variations of crop rotation included in the trial, the average energy yields from each crop per crop rotation were calculated separately (e.g., average energy yields from wheat in the crop rotation "100% wheat," average wheat energy yields in the crop rotation "67% wheat" and similarly in the crop rotation "25% wheat"). The average energy yield was multiplied by the

proportion of the crop in the rotation variant, and the proportional energy distribution from each crop in the rotation were determined.

Soil Organic carbon (C_{org}) was determined by comparing it with the organic matter content (%) in soil using the "*Van Bemmelen* factor" – conversion factor 1.724 (Minasny et al., 2020) (see formula (4)).

The soil's organic matter content was determined in the State Plant Protection Service agrochemical laboratory in 2010, 2017, and 2022 according to Procedure No. 1 of the Ministry of Agriculture of the Republic of Latvia of 4 January, 2022. Which is equivalent with the methods used in 2010 and 2017. Samples from three different soil layers were submitted for analysis: 0–20 cm, 20–40 cm, and 40–60 cm.

Soil analysis data for comparison of C_{org} content from 2010 onwards have been obtained as part of an earlier project: VPP-5.3.1. (Nr. VP26) Sustainable use of local agricultural resources for the development of nutritionally enhanced foodstuffs" (FOOD) sub-project 3.1 "Sustainable use of soil as a key resource for the extraction of safe and high-quality food and feed materials from the most widely grown arable crop species". The project implementation period was from 2010–2013.

For the calculation of the C_{org} stock (t ha^{-1}) in the soil at the depths of 0–20 cm, the calculated C_{org} content (%) and average soil bulk density (t m^{-3}) were used. Soil bulk density data were taken from soil analyses carried out in 2017 (the resulting data are published in the Annex to the report of Ministry of Agriculture subsidized Project 310 "Influence of minimal soil tillage on its fertility maintenance, development and distribution of pests as well as crops' yield and quality in resowings"). C_{org} at depths 0–20 cm was calculated using formula (5).

The economic benefit of crop production, depending on the crop rotation and the soil tillage system, has been assessed using gross coverage calculation. Gross coverage has been calculated according to the methodology developed by the Latvian Rural Advisory and Training Centre (hereinafter – LLKC). Gross coverage was obtained by deducting variable costs for raw materials and machinery operations from production sales revenue. For gross coverage calculation, the RSF "Pēterlauki" accounting documents for 2016, 2017, 2018, 2019, and 2020 were used in addition to the data compiled by the LLKC average sales prices of plant protection and fertilizer materials in the country for 2016, 2017, 2018, 2019, and 2020. Machinery operations were calculated using the average tractor service prices compiled by LLKC in the Zemgale region in 2016, 2017, 2018, 2019, and 2020. Data prepared by LLKC regarding gross coverage on average grain/seed sales prices in Latvia during the harvest years were used for agricultural production sales prices. Prices for winter wheat were used according to the quality group obtained: grain of food or feed following the procurement requirements of "Latraps" in 2022.

Each crop rotation's average annual economic benefit, expressed as gross coverage, has been calculated. The calculation is based on average gross

coverage values for each crop per year, considering the crop's proportion in the crop rotation (see formula (6)). Crop rotation average annual economic benefit has been calculated separately for conventional and reduced soil tillage.

For **data mathematical processing** dispersion, correlation, and regression analysis were used. The significance of the difference in results has been assessed at level of 95% using the least significant difference value ($RS_{0.05}$) or Bonferroni test. Softwares MS Excel and RStudio were used.

Characterization of meteorological conditions

Meteorological conditions at the trial site were recorded using the stationary, automatic weather station Davis Wireless Vantage Pro2 Plus UV & SOLAR, located at the test site "Poķi". The meteorological data obtained during the trial period have been compared seasonally and with the long-term observations (also referred to as "norm"; the average data of the last 30 years) at Jelgava Hydrometeorological station.

Season 2016/2017 was characterised by moderate air temperatures and optimal precipitation in August, but reduced precipitation in the autumn months. The winter was warmer than long-term observations. Spring and summer were characterised by moderate temperatures, with optimum rainfall in spring and early summer, heavy rains in July and low-to-moderate rainfall in August and during harvest time.

In season 2017/2018, September and October were very rainy, with warm air temperatures. February was the coldest of the winter months, but the average temperature in December and January was higher than long-term average data. April was rich with precipitation but very warm. In the following months until the crop ripening time, there was a moisture deficit with increased air temperatures. During the spring and summer period, there was low precipitation throughout the growing season, which was only 64% of the norm in the spring months and 33% of the norm in the summer months. Air temperature in the growing period was increased.

Season 2018/2019 continued with a pronounced moisture deficit from autumn 2018 until July in 2019. In July, a relatively large amount of precipitation was observed which, however, was only slightly higher than the norm in July. Air temperatures were moderate until January in 2019, after which temperatures started to increase if compared with more than long-term observations. Extreme heat was observed in June, while the other summer months had moderate temperatures, although slightly warmer than normal.

Season 2019/2020 differed from the others, being warmer and with more precipitation in the autumn months: 2.4 times higher than the long-term observations. In the winter period, the average temperature per month did not fall below 0 °C. Temperatures were moderate in spring and summer, but June was hotter if compared with long-term observations. The amount of precipitation

from April to the middle of June was insufficient for crop production. In the last days of June, an extreme amount of rain fell, which caused the lodging of winter wheat.

The effects of meteorological conditions on plant growth and development were assessed **using a hydrothermal coefficient (HTC).** This shows the ratio between rainfall (multiplied by 10) and temperature sum (above 10 °C) in analysed period. The moisture provision is optimal if the coefficient is 1–2 (> two moist, < too dry).

RESULTS

Winter wheat growth and development, yield and quality

Winter wheat was sown at optimum sowing time in 2016 (10 sept.) and 2019 (19.sept.). Late sowing time was in 2017 (30. sept.) when the sowing was delayed by frequent rainfall in August and September. Meanwhile, in 2018, the sowing term was early (06. sept.) due to the dry and hot summer when the forecrop was harvested early and some rainfall occurred on September 5. Given the early sowing date, the winter wheat sowing rate was reduced by 50 germinable seeds per m^2 compared to previous years. After a prolonged summer drought that unfortunately continued into September, and winter wheat sprouted unevenly in autumn 2018.

The soil moisture content during winter wheat germination in 2017 was sufficient to facilitate relatively rapid sprouting; the beginning of sprouting was recorded on the 13th day after sowing. During the first measurement, number of sprouted plants (p=0.06) was higher in the CT variant (56.3%) and field germination was 46.2% in the RT variant. According to the last measurement, no significant differences were found between field germination depending on the soil tillage systems (p=0.66). Field germination was very high: CT 98.3% and RT 96.4%. The effect of the crop rotation on field germination was not observed. The fastest sprout number increase occurred between the first and second accounting times (see Figure 3).

In September 2018, sprouting had been delayed due to drought and it was uneven. The first crop measurement was carried out on the 21st day after the sowing, when the first sprouts appeared in the RT variant, and the sprout count was significantly different depending on the soil tillage options (p=0.0007) it was higher in the RT variant. No significant effect (p=0.65) of crop rotation was observed; however, a separate analysis of the impact of crop rotation in variant RT showed that the highest sprout count at the last measurement was in repeated wheat sowings (38.7% at first counting and 84.1% at last measurement), which could be due to the sprouting of spilled grains in repeated wheat sowings. A significantly (p=0.02) higher average sprout count in the RT variant was found in the last counting (72.0%), compared to CT (52.5%). Analyzing the dynamics of germination (see Fig. 3) in 2018, it should be concluded that despite a more rapid increase in the number of germinated sprouts in the TA variant in five accounting times, field germination in this variant was low.

Year 2019 was characterized by optimal weather conditions for winter wheat sprouting. The beginning of the germination was marked on the 12th day after the sowing. In the first sprout measurement higher sprout amount was found in the RT variant than in the CT variant (p=0.06) (see Fig. 3). Significant differences depending on the soil tillage variant were found in the last measurement. The

overall field germination was very high – 98.9% CT and 96.4% RT. The effect of crop rotation on field germination was not detected.

The fastest germination of wheat was observed in 2017 in the CT variant and in 2019 in the RT variant, when, as early as the third measurement field germination exceeded 90%. The effect of crop rotation on field germination was not detected in any of the years.

Winter hardiness was high throughout the study period and rated with 9 points throughout the study periods.

The recovery time of vegetation in spring varied depending on the study year. Vegetation recovered in spring 2019 and 2020 at 2nd ten-day period of March, 2nd ten-day period of April in 2017, and 1st ten-day period of April in 2018.

The length of the vegetation period in 2017 and 2020 was 214 and 215 days, respectively. The shortest growing seasons were in 2018 and 2019 – 204 and 206 days, respectively. The shortest periods were characterized by elevated air temperatures and reduced rainfall, contributing to faster plant development and maturation.

Resistance to the lodging was high in three of the four seasons – rated with 9 points, except for summer 2020, when heavy rainfall at the end of June contributed to winter wheat lodging. The average lodging resistance rating in this season was 6.4 points. Lodging was not observed in the repeated wheat sowings in tillage option RT (9.0 points). With an average rating of 7.0 points, the "67% wheat" options for both soil tillage options and "25% wheat" for RT were evaluated. Lodging resistance for crop rotation "25% wheat" in CT variant was 5.6 points. The lowest lodging resistance was observed in repeated wheat sowings using CT – 2.5 points on average. Significant effects of the soil tillage variant ($p<0.001$) on the lodging resistance of winter wheat had been identified: CT averaged 5.1 points and RT – 7.7 points. The lodging resistance had a strong positive relationship with the 1000 grain weight ($r=0.686>r_{0.05}=0.404$, $n=24$), but there was no close relationship with the thickness of the plants $r=|-0.434|>r_{0.05}=0.404$, $n=24$).

Winter wheat grain yield in the study was significantly influenced by the season ($p<0.001$) and the crop rotation variant ($p<0.001$). Still, yields were not significantly different between the soil tillage variants ($p=0.33$) (see Table 2).

Significant interaction effect on wheat yield was found (soil tillage system × crop rotation $p<0.001$; soil tillage system × year $p<0.001$; crop rotation × year $p=0.01$). The highest yields were obtained in 2017, with the most appropriate humidity and temperature conditions. The lowest average yield occurred in 2019.

The average winter wheat yield in crop rotation "100% wheat" was 5.39 t ha^{-1}, which was significantly lower ($p<0.001$) than when grown in a crop rotation of "67% wheat" (average– 6.40 t ha^{-1}) or "25% wheat" (average – 6.77 t ha^{-1}). Wheat yields were steadily higher when grown in a crop rotation with other crops than in long-term wheat repeated sowings.

The positive effects of oilseed rape as a forecrop on winter wheat yields persisted for at least two years (see fig. 4). The results confirm the positive impact

of plant diversification on the production of winter wheat. Higher average yields in repeated wheat sowings were obtained using CT (except for 2017), but using RT in variants with oilseed rape or field beans as forecrops.

The average wheat straw yield during the study period, similarly to the grain yield, did not differ significantly depending on the soil tillage systems ($p=0.087$); however, the winter wheat straw yield was significantly higher in 2017 in RT. Average straw yield in crop rotation "25% wheat" (8.66 t ha^{-1}) was significantly higher ($p<0.001$) than in the other two crop rotation options studied ("67% wheat": 6.49 t ha^{-1}; "25% wheat": 7.21 t ha^{-1}). The highest straw yield was obtained in 2017 (9.27 t ha^{-1}) when the highest grain yields were also obtained. The lowest straw yields occurred in 2018 (5.93 t ha^{-1}) and 2019 (5.74 t ha^{-1}). Winter wheat straw yields, depending on the studied forecrops, were significantly higher when the forecrops were rapeseed or field beans ($p<0.001$) (see. Fig. 5).

The winter wheat harvest index (HI) varied by study year ($p<0.001$) but did not differ significantly depending on the crop rotation and soil tillage options studied. The highest HI was in 2018 and 2019 (0.51 and 0.50, respectively), characterized by lower yields and visual observation of short plant lengths, which reduced straw mass and increased grain share in total biomass.

Forecrop had a significant impact ($p=0.0007$) on the HI. The highest HI was observed in variants where the forecrop was wheat ("100% wheat" – 0.47 and "67% wheat" – 0.50) and the lowest it was in variants where the forecrop was field beans and oilseed rape (0.46 and 0.45). The results confirmed that higher biomass yields resulted in higher winter wheat grain yields. The straw yield correlated significantly negatively with the harvest index ($r=|-0.826|>r_{0.05}=0.196$, $n=96$).

The values of the yield components of winter wheat (number of spikes, m^{-2}, number of grains per spike, 1000 grain weight) varied significantly depending on the forecrop in crop rotation and growing seasons. No effect of soil tillage was found (Table 3).

The average number of spikes was significantly lower in 2019 (401.9 pieces m^{-2}), which was affected by insufficient precipitation in summer and autumn 2018 to ensure optimal humidity conditions in soil for plant sprouting. The lowest number of spikes m^{-2} was observed on a crop rotation where the winter wheat forecrop was wheat, growing it in a crop rotation of "67% wheat" (Table 3). However, data for this variant was captured only in 2018 and 2019, which stood out because of extreme drought, thus also worsening the overall average.

The number of grain per spike in winter wheat varied significantly depending on the study years ($p<0.001$) and also depended on the forecrop in the crop rotation ($p=0.04$) (see Table 3). The highest number of grains per spike was observed in the crop rotation "67% wheat" with the forecrop wheat after oilseed rape, and in the crop rotation "25% wheat". The high number of grains in the winter wheat spike after the oilseed rape may be due to the years of the lowest

number of productive spikes m^{-2} in this option (2018, 2019). A significant ($p < 0.001$) negative relationship between the number of spikes and the number of grains in the spike was found ($r=|-0.480|>r_{0.05}=0.200$; n=96).

The highest average 1000 grain weight was obtained in 2017 (46.1 g) and 2019 (45.2 g), which was significantly higher compared to the values in 2018 and 2020 (41.8 and 41.7 g, respectively) (Table 3). It was possible to obtain a higher 1000 grain weight in 2017 because HTC in critical development stages (from ear emergence to ripeness for harvesting) was within optimum limits, while in 2019, a higher 1000 grain weight could be formed due to the reduced number of spikes m^{-2} (average 401.9 pieces m^{-2}). By contrast, in 2018, a low 1000 grain weight could have formed due to insufficient rainfall (in the period from the beginning of the stem elongation to the ripeness, HTC was <0.5). The low average 1000 grain weight in 2020 was influenced by wheat lodging, which disrupted the complete filling of the grain. During the study period, the average 1000 grain weight was higher when growing wheat in a crop rotation of "25% wheat" (45.2 g) but significantly lower in repeated wheat sowings (42.5 g). There was a significant ($p=0.0002$) relationship between resistance to lodging and the 1000 grain weight in 2020.

Studied grain quality indicators were not affected by the soil tillage system and crop rotation (protein, gluten, and starch content,%; Zeleny index, falling number, s; volume weight, kg hL^{-1}); however, some of the quality indicators assessed varied depending on the forecrop in the crop rotation and all indicators varied significantly depending on the study season (see Table 4).

Protein content (%) varied significantly depending on the study season ($p<0.001$), with an average highest content of 13.8% in 2019 and a lowest of 10.2% in 2018 (Table 4). Low protein content in the grain in 2018 (average 10.2%) was caused by heat and drought, resulting in plants not being able to absorb nitrogen fertilizer, while in 2019, high protein content in the grain (average 13.8%) can be explained by rainfall in July and the resulting lower average grain yield throughout the study period.

The forecrop in crop rotation did not significantly influence the protein content in the grain ($p=0.394$). Higher mean protein content was ensured by crop rotation where wheat was not grown after oilseed rape, but there were nuances between the results obtained during the study years. In 2019, the protein content of winter wheat grain in the crop rotation "67% wheat" with a forecrop of winter wheat provided the highest protein content of 14.1%, compared to repeated wheat sowing (13.7%) and field beans (13.7%) as a forecrop. The interaction effect of crop rotation × soil tillage system on the protein content in the grain was observed in 2020.

The gluten content (%) of the grains varied significantly ($p<0.001$) depending on the study season, and there was a tendency for variations depending on the forecrop in crop rotation (see Table 4). Gluten and protein content had a significant close relationship ($r=0.995>r_{0.05}=0.206$, n=96). Significant differences in gluten content existed between all study years, being 29.7% in

2019, 22.8% in 2020, 20.9% in 2017, and 18.5% in 2018. The highest gluten content was in the crop rotation “25% wheat”.

The mean values of the Zeleny index varied significantly depending on the study years ($p < 0.001$) and the forecrop in crop rotation ($p = 0.04$) (see Table 4). Similar to the highest protein content, the highest value for the Zeleny index was 51.7 in 2019 and the lowest was 22.8 in 2018. Analysis on a case-by-case basis shows that the values of the Zeleny index varied significantly depending on the soil tillage variant in 2017 and 2020. The higher Zeleny index in the RT option was in 2017 and the CT in 2020. When analyzing the effect of crop rotation on the Zeleny index value of winter wheat grains, it should be concluded that the results obtained during the study seasons were contradictory.

The mean volume weight (kg hL^{-1}) over the study period was significantly different depending on study seasons ($p<0.001$). Still, the impact of other studied factors on the averages obtained during the trial period was insignificant (see Table 4). The highest average volume weight of winter wheat grains was found in 2017 (81.3 kg hL^{-1}), the lowest in 2020 (74.2 kg hL^{-1}), and there were significant differences between all volume weights obtained during the trial years. The crop rotation had significant impact on the grain volume weight for each study year separately. In all years of the study except for 2017, the volume weight obtained in the crop rotation “100% wheat” was the lowest, and in the crop rotation “25% wheat” was the highest, as well as significantly higher than that in the variant “100% wheat”.

Falling number (s) was high throughout the study period, with the average falling number between study seasons ranging from 329 s to 346 s. Significant differences were observed ($p=0.018$) depending on the years of the study. Still, the difference was only 17 s, which is not considered agronomically important at high falling number, all of which met food quality grain requirements. Analysing each study year separately, no influence on the value of the falling number was found for forecrops in the crop rotations. A higher average falling number for winter wheat grains in 2020 was observed in CT (361 s) than in a RT system (332 s) ($p=0.08$).

Starch content (%) significantly ($p=0.019$) varied depending on the forecrop in the crop rotation. Changes in starch content in wheat grain may be due to differences in protein content depending on the crop rotation, with a significant negative relationship between the protein and starch content ($r=|-0.806|>r_{0.05}=0.206$, $n=96$). Average starch content values varied only 1.3% depending on the forecrop (68.7%–70.0%).

The quality of winter wheat grains in 2017, 2018, and 2020 matched the feed quality in most variants (see Table 5). Only in 2019 food quality grain was obtained in all variants according to procurement requirements of “Latraps”.

Analysing each year, it was found that in 2017, food quality grain was obtained in the variant “100% wheat, RA”, the limiting indicators being protein and gluten content. In 2018, food quality grain was obtained only in the variant “67% wheat, RT” after oilseed rape as a forecrop, the limiting indicator being

gluten content; other variants produced feed quality grain. The highest quality grain was obtained in 2019, compliance to the grain quality group being limited by the volume weight indicator. The compliance to quality group of the 2020 was limited by different quality indicators, but most variants required feed quality group, except for the option “25% wheat, CT”.

Yield and quality of other studied crops

Winter oilseed rape yields varied significantly between 2017 and 2020 ($p<0.001$). Still, no differences were observed between yields in the soil tillage systems studied ($p=0.81$) or crop rotations ($p=0.278$) in which oilseed rape was grown during the study.

Differences in yields during study years may be explained by meteorological conditions during study seasons. Still, as different varieties were grown in each study year, there could also be significant differences in the ability of varieties to produce under certain conditions. The highest oilseed rape yield was obtained in 2020 at 3.95 t ha^{-1}.

The oilseed rape harvest index was the lowest among all crops grown in crop rotation, with an average of 0.3. The harvest index was similar depending on the soil tillage systems applied but varied by study year. The harvest index could also vary due to the different varieties used, although the characteristics of the varieties did not find any of the varieties to have a dwarf gene.

The number of winter oilseed rape plants m^{-2} during the study period varied significantly depending on the soil tillage system ($p=0.003$) (see Table 6). The number of plants m^{-2} in the trial period was significantly higher using CT (41.6 plants m^{-2}) compared to RT (32.2 plants m^{-2}). Other researched indicators (1000 seed weight, volume weight, oil content) were not significantly affected by the soil tillage variant or crop rotation, but were significantly influenced by growing season.

Spring barley grain yield during the study was significantly influenced by the trial season ($p<0.001$), and the slight tendency of the tillage system effect on yield was also observed ($p=0.07$) (see Figure 6). The highest yields were obtained in 2017 (6.41 t ha^{-1}), characterized by the most optimal humidity and temperature conditions. The lowest average yield was acquired in 2018 (3.08 t ha^{-1}), when rainfall was low during the early stages of the growth and development of barley, and subsequently insufficient precipitation during the stem elongation and grain filling affected yield amount. The spring barley HI was 0.43 on average during the study period. The HI varied significantly between study seasons ($p<0.002$). The highest HI was observed in 2017 at 0.46 and significantly lower in 2018 and 2019 (0.42 and 0.41, respectively).

The values of the yield components (productive spikes m^{-2}, grain per spike, 1000 grain weight) and grain quality indicators (volume weight, protein and

starch content) of spring barley varied significantly between the growing seasons. Still, none of the indicators differed significantly depending on the soil tillage systems, on average, over the whole period (see Table 7 and 8) or within each year.

Field bean seed yield varied significantly between 2018 and 2020 depending on the soil tillage system (p=0.01) and the study year (p<0.001) (see Figure 7). The highest yields were obtained in 2019 and 2020 (3.43 and 3.29 t ha^{-1}, respectively) but yields were significantly lower in 2018 (2.58 t ha^{-1}), which has already been described as extremely dry year. While HTC was insufficient in 2019, the temperature and rainfall distribution during flowering and pod filling were more favourable than in 2018, producing higher yields. Field bean yield was higher in the CT variant (3.17 t ha^{-1} on average) than in RT variant (3.03 t ha^{-1} on average) (p=0.01). The average difference in field bean yields, depending on the soil tillage variant, was low in all study years: 230 kg ha^{-1} in 2018, 90 kg ha^{-1} in 2019, and 100 kg ha^{-1} in 2020. The higher difference between the two tillage systems was in the dry year of 2018 when the lowest yields were obtained.

The field bean HI averaged 0.49 and was mathematically not significantly different at 95% confidence level between study seasons (p=0.079) and soil tillage options (p=0.267). The highest harvest index (0.52) was observed in 2019, suggesting that the weight of field bean seeds was slightly higher in 2019 than that of straw.

The yield component values of the field bean (plants per 1 m^2, pods per plant, seeds per pod, 1000 seed weight) varied significantly between the growing seasons, while the significant impact of the tillage system was observed only for the 1000 seed weight (p=0.0004) (see Table 9).

During the study period, the highest average 1000 seed weight was obtained in 2019 (546.1 g), significantly higher than in 2018 and 2020 (468.2 and 476.2 g, respectively). The higher average 1000 seed weight occurred using RT.

A strong positive relationship has been established between the number of pods per plant and the yield of field bean seeds ($r=0.830 > r_{0.05}=0.404$, n=24), while a negative close relationship has been established for the number of plants m^{-2} with the number of pods per plant ($r=|-0.852| > r_{0.05}=0.404$, n=24).

The protein content (%) in seeds on average was 32.3% during the trial period and was stable regardless of the study season (p=0.233) and the soil tillage system used (p=0.658). The mean volume weight was the highest in RT (756.4 g L^{-1}) and the lowest in CT (735.5 g L^{-1}). The highest average volume weight in the reduced soil tillage system was provided by the volume weight difference in 2018, when, under drought and heat conditions, plants were better supplied with moisture and nutrients in option RT and produced a higher 1000 seed weight. Between the years of the study, the significantly (p<0.001) highest mean volume weight was observed in 2019 (773.3 g L^{-1}), when the significantly higher 1000 seed weight (546.1 g) was also found.

Energy yields of plant biomass

The crops involved in crop rotations differed from each other, both in terms of the mass of primary and by-products produced (t ha^{-1}) and the chemical composition of the biomass parts, which determine their different energetic capacity or value (MJ kg^{-1}).

The highest energetic value among the crops included in the study and their biomass parts was for winter oilseed rape seeds: on average 28.58 MJ kg^{-1}; the highest it was in 2019 (29.23 MJ kg^{-1}) and the lowest in 2020 (27.90 MJ kg^{-1}). The oilseed rape energetic value and the seeds' oil content were closely correlated ($r=0.792>r_{0.05}=0.292$, n=44). The average energetic value of field bean seeds was 18.96 MJ kg^{-1}, but significant differences in the energetic value of bean seeds depending on the trial year were found: the highest it was in 2020 (20.09 MJ kg^{-1}) and the lowest – in 2018 (17.84 MJ kg^{-1}). The energetic value of grains of cereal species was, on average, for winter wheat 17.75 MJ kg^{-1} and for spring barley 17.46 MJ kg^{-1}, which was lower than the energetic value of straw of the same species (for winter wheat 18.37 MJ kg^{-1} and for spring barley 17.83 MJ kg^{-1}). When comparing the energetic value of the post-harvest residues between included plants, there were no big differences. The highest average energetic value was observed for winter wheat straw and the lowest was for field bean post-harvest residues (17.82 MJ kg^{-1} on average). The effect of soil tillage on the energetic value of crop seeds and post-harvest residues was not found ($p>0.05$). A significant influence of the forecrop ($p<0.001$) was found on the average energetic values of winter wheat grains and straw during the study period. Winter wheat grown after field beans had the highest energetic value for grain (18.01 MJ kg^{-1}), while winter wheat straw grown after field beans had the lowest energetic value (18.21 MJ kg^{-1}) among the studied variants.

The crops included in the study differed from each other in the amount of obtained average energy yield (GJ ha^{-1}) in each of the study seasons (see Figure 8). Evaluating the average energy yields among crops ($p<0.001$), it was found that the highest energy yield was obtained from winter wheat (average energy yield 212.43 GJ ha^{-1}) and winter oilseed rape (on average 209.99 GJ ha^{-1}); a significantly lower average energy yield was obtained from spring barley (on average 167.42 GJ ha^{-1}) and the lowest (significantly different from barley energy yield level, $p<0.001$) was that from field beans (101.13 GJ ha^{-1}).

The obtained energy yield (GJ ha^{-1}) was variable over the years depending on the crop rotation and tillage system. No significant differences in energy yield were found during the study period depending on soil tillage variant ($p=0.553$). The average energy yield obtained over a four-year period in the CT variant was 188.9 GJ ha^{-1} and in RT variant was 193.9 GJ ha^{-1}.

The average annual energy yield according to the results obtained in each plot of the trial variant depended on crop sequence and the meteorological conditions in particular years (see Figure 9). It was found that the lowest energy yield was

obtained in the crop rotation “25% wheat” (crop sequence: oilseed rape–spring barley–field beans–winter wheat), where spring crops, barley and field beans, were grown in 2018 and 2019, respectively, which resulted in a low biomass yield and in its turn, low energy yield. The average annual energy yield for crop sequence OR–B–FB–W was 150.96 GJ ha^{-1}, of which only 66.36 GJ ha^{-1} was the energy obtained from primary production, and 84.60 GJ ha^{-1} from post-harvest residues. The highest average annual energy yield was obtained in the two crop sequence variants included in the rotation “67% wheat” (W–W–OR–W 216.27 GJ ha^{-1}; OR–W–W–OR 213.23 GJ ha^{-1}).

The energy yield of the crops included in the crop rotations and its share in the total energy obtained from full rotation was not always proportional to the share of the crop in the rotation. In the three-year rotation “67% wheat”, the average energy yield from the two-year winter wheat energy yields (average 457 GJ ha^{-1}) made up 68% of the total energy, while the energy yield from winter oilseed rape was 32% (214 GJ ha^{-1}), and oilseed rape occupied 33% of the rotation length. Analysing the “25% wheat” rotation of four different crops, it was concluded that the energy yield of winter wheat made up 35% of the total energy gained from four-year rotation, despite the fact that the share of wheat in the rotation makes up only 25%. However, it should be emphasised that the energy accumulated in the biomass of winter wheat and its fore-crop (field bean) together made up 49% of the total energy obtained in the crop rotation, and the high winter wheat energy yield was obtained due to the influence of the forecrop on the wheat biomass. The second largest proportion of the energy accumulated in the crop rotation “25% wheat” was from winter oilseed rape (28%, on average 200 GJ ha^{-1}). On average, during the four-year research period, spring barley had produced almost as big an energy yield proportion (23%) as its proportion in crop rotation (25%). Its energy yield was 167 GJ ha^{-1}. In order to determine which crop is the most beneficial in terms of energy yield, one cannot forget about the effect of forecrops in the crop rotation.

Accumulation of soil organic carbon

Soil organic carbon content varied significantly between the years at all soil depths studied ($p<0.001$). Still, no significant effect from crop rotation or soil tillage system on C_{org} content was found depending on the options researched (see Tab. 10, Fig. 10).

Soil C_{org} content in soil depth 0–20 cm increased during the study compared to carbon content after trial placement (the trial was set up in 2008, and the C_{org}

content was determined in 2010[10]). A higher increase in C_{org} content at depths of 0–20 cm after seven years was observed in CT variant (+0.800%, RT +0.627%), while 12 years later (2022), higher C_{org} content was observed in samples collected in RT variant (CT +0.557%, RT +0.795%).

Decreases in C_{org} content have been observed as soil depth increases (see Figure 10). The mean C_{org} content at depths of 0–20 cm over all three years when samples were collected was 19.5% higher than at depths of 20–40 cm. The increase in C_{org} content from 2017 to 2022 between the two soil depths was higher in the RT variant (19.6%) than in the CT variant (13.7%). The difference in C_{org} content between soil depths did not exceed 1% in either option.

Soil C_{org} content at depths of 20–40 cm increased by 64.7% between 2010 and 2022, to 1.586% compared with C_{org} content in soil in the 2010. When comparing soil C_{org} content between soil tillage systems, a higher increase of C_{org} after seven years (2017) was observed in the CT variant – by 0.887% – and in the RT variant by 0.620% (average CT content – 1.850%, RT – 1.583%), while in 2022, the difference of C_{org} content in the RT and CT variants was only 0.04% (CT – 1.5++%, RT – 1.606%).

The average soil organic carbon content at 40–60 cm depth in the study increased by 143.6% from 0.644% to 1.569% between 2010 and 2022. When assessing C_{org} content according to the soil tillage system, a higher increase in carbon content after seven and 12 years of the study was observed in the CT: 1.389% in 2017, 1.665% in 2022, RT: 1.027% in 2017, 1.473% in 2022. C_{org} content growth was 86.0% between 2010 and 2017, while it was 30.9% between 2017 and 2022.

During the twelve years of this study (2010–2022), no significant changes in carbon stocks were found at a soil depth of 0–20 cm depending on the soil tillage system used ($p=0.066$) or crop rotation ($p=0.391$) (see Figure 11). A significant increase in the amount of C_{org} in the soil surface was observed when comparing results by study years ($p<0.001$). C_{org} stocks averaged 61.20 t ha^{-1} in 2017, significantly different from the C_{org} stocksset in 2010 (39.67 t ha^{-1}).

Trends in soil C_{org} changes depending on soil depth could perhaps be explained as an increase in the C_{org} content in the deepest layer (40–60 cm) in 2022 due to a decrease of C_{org} content in the mean depth (20–40 cm), when soil particles with the attached C_{org} may have been deposited in lower soil layers. The biomass of post-harvest residues of plants left for microbiological processes in 2018 and 2019 was negligible, leaving less needed raw material for the C_{org} increase in the soil layer 0–20 cm.

[10] Data from project VPP-5.3.1. (Nr. VP26) Sustainable use of local agricultural resources for the development of nutritionally enhanced foodstuffs" (FOOD) sub-project 3.1 “Sustainable use of soil as a key resource for the extraction of safe and high-quality food and feed materials from the most widely grown arable crop species”

Economic assessment of crop rotation and soil tillage systems combinations

The crop production systems' expenses and revenues differed between the included crops due to the market prices and yield level in each year. The average purchase prices were variable between the years of the study according to the market situation (see Table 11). The highest purchase price in all trial years was for rapeseed (359 EUR t^{-1} on average) and the second highest purchase price was for field bean seeds (217 EUR t^{-1} on average), followed by wheat grains that met the requirements for food quality (167 EUR t^{-1} on average) or feed quality (on average 151 EUR t^{-1}). The lowest purchase price was for barley grain (on average, 144 EUR t^{-1}). The largest price fluctuation between the years of the study was for barley grain, which was around 47 EUR t^{-1} between the purchase prices of 2017 and 2018. The highest revenues were gained from winter oilseed rape in 2020, but in other years of the study, the highest revenues were generated by winter wheat grains, while the lowest revenues were obtained from the grains/seeds of spring crops (see Fig. 12).

The expenses depending on the compared crop production costs differed only in the area "Technical operations costs" due to different tillage operations in studied tillage systems (see Fig. 13). There were small differences in value between tillage options due to the fact that the soil disc-harrowing used in the reduced tillage variant was performed twice and was followed by soil treatment with a cultivator, which was the same as in the conventional tillage variant after ploughing. The need for double disc harrowing of the soil is explained by the granulometric composition of the soil: silt, which is heavy with fine soil particles; therefore, several soil tillage passes were necessary. If the disc harrowing was performed only once, the cost difference between CT and RT variants would be 39.70 EUR ha^{-1} in 2017, 34.39 EUR ha^{-1} in 2018, 41.43 EUR ha^{-1} in 2019 and 37.08 EUR ha^{-1} in 2020.

Due to minimal cost differences in tillage expenses, the average crop production expenses by the outcome groups were calculated as the average value for "Machinery operations' costs". The costs of technical operations made proportionally the highest cost position for all included crops (see Fig. 14). For crops with lower total average cultivation costs (barley and field beans compared to winter wheat and rapeseed), the area "Machinery operations" accounted for a larger share: 59.1% for spring barley and 53.8% for field beans.

The second largest area in the variable costs for cereals and oilseed rape was "Fertilizers". In the field bean cultivation technology, mineral fertilisation was proportionally the smallest cost (8.8%). The smallest expenditure section for winter wheat and winter oilseed rape cultivation technologies was for sowing material. For spring barley, the smallest position was for "Plant protection products", because only herbicide was used annually, but the use of fungicide and insecticide depended on the distribution of harmful organisms in the field in

a specific season. Winter oilseed rape cultivation technology did not include fungicide spraying in any of the years of the study, which reduced the share of cost of plant protection products in total, as fungicide is often the most expensive product for plant protection. Cultivation technology for field beans provided a high seed material proportion in costs (18.9%) and a little lower expenditure (17.9%) was on plant protection products.

The most profitable crop sequence in the four-year (2017–2020) study period (see Fig. 15) was oilseed rape–wheat–wheat–oilseed rape in the crop rotation "67% wheat". The gross coverage in four years amounted to 2189 EUR ha^{-1} if the RT system was used, and 1843 EUR ha^{-1} in the CT system. The next most profitable variant was in the crop rotation "25% wheat" with the crop sequence barley–field beans–wheat–rapeseed in the CT system (1736 EUR ha^{-1}).

In the studied four-year period, the least profitable crop sequence was oilseed rape–spring barley–field beans–winter wheat in the crop rotation "25% wheat" in the CT system, in which the four-year profit amounted to only to 819 EUR ha^{-1}, which was 2.67 times less than the most economically valuable option (OR–W–W–OR, RT). The most economically disadvantageous crop rotation options were "100% wheat", where the average gross profit between both tillage systems in four years was 1024 EUR ha^{-1} and the rotation "25% wheat" with the crop sequence winter oilseed rape–barley–field beans–winter wheat – 904 EUR ha^{-1}, due to the low spring crop yield in the dry 2018 and 2019 seasons.

CONCLUSIONS

1. Although the growth and development of winter wheat did not depend on the crop rotation studied during the autumn and summer vegetation periods, the start and pace of winter wheat sprouting varied depending on the soil tillage system studied. The advantages of different rainfall amount during the years of the study were for one soil tillage system and the for the other. Still, significant difference in field germination was observed only in the extremely dry year of 2018, demonstrating the benefits of reduced soil tillage for winter wheat germination. (Task 1, thesis 1)
2. Average winter wheat grain and straw yields were equivalent in conventional and reduced tillage systems, with significantly higher average wheat yields resulting from the crop rotations "67% wheat" and "25% wheat" compared to wheat repeated sowing. Winter wheat yields, grown after field beans and oilseed rape, were higher using reduced soil tillage, but when grown in repeated wheat sowings wheat yields in three of the four study years were higher using a variant of conventional soil tillage. (Thesis 1)
3. The average values of winter wheat yield components were equivalent depending on the soil tillage systems. Yield components were influenced by the conditions of the study years and, in some cases, by the forecrop in the crop rotation. The average 1000 grain weight varied significantly depending on the forecrop in the crop rotation, and the highest was in the crop rotation variant "25% wheat" where the winter wheat forecrop was field beans. The number of spikes m^{-2} and the number of grains in the spike were not significantly different in any of the study years, depending on the forecrop in the crop rotation options. (Thesis 1)
4. The average values of the winter wheat grain quality indicators (protein content, gluten content, Zeleny index, falling number, volume weight) were independent of the soil tillage system or crop rotation variant studied. The effect of the winter wheat forecrop on gluten content and Zeleny index was significant and higher when wheat was grown after field beans. Significant differences over the study years have been observed for all quality indicators, leading to the conclusion that the meteorological situation of the specific years had the most significant impact on grain quality. (Thesis 1)
5. The yield of winter oilseed rape and spring barley in the trial was equivalent in both soil tillage systems. At the same time, the average yield of field beans was slightly but significantly higher in the conventional soil tillage system. (Thesis 2)
6. The most energy productive crops included in crop rotation were winter wheat (212.43 GJ ha^{-1}) and winter oilseed rape (209.99 GJ ha^{-1}). Energy yields varied significantly depending on the crop rotation variants studied, but differences depending on the soil tillage systems were not significant. The highest energy yield (GJ ha^{-1}) of the crop rotation options reviewed was

provided by the crop rotation “67% wheat”, while the crop rotation “25% wheat” provided equivalent energy yield to for the “100% wheat” rotation; low energy yield from the “25% wheat” rotation was linked to low spring crops yields in the dry years of 2018 and 2019. Thus, the hypothesis of obtaining higher energy yields by reducing the proportion of wheat in crop rotation failed to be proven over four years. Hypothesis 1 partially confirmed, that by reducing the proportion of wheat in crop rotation, the amount of energy accumulated in crop rotation increases (Thesis 3)

7. The soil organic carbon content increased significantly over the twelve years (2010–2022) at all soil depths studied (0–20 cm, 20–40 cm, 40–60 cm). Still, during the study period, soil organic carbon content and stocks (0–20 cm) were not significantly affected by the crop rotation or soil tillage system studied. Soil organic carbon content depended on soil depth. (Thesis 4)
8. Crop rotation variants with two or more crops provided higher gross coverage with two or more crops compared to long-term repeated wheat sowings. During the study period, the most economically advantageous was the crop rotation “67% wheat” using reduced soil tillage, followed by roation “25% wheat” using both tillage options. The fluctuating raw material prices and crop yields influenced the economic result. The hypothesis that growing wheat in a diversified crop rotation is economically justified has been partially proven. (Thesis 5)

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was based on the funding of four projects:

1) National Research Programme AgroBioRes "Agricultural resources for sustainable production of high quality and healthy food in Latvia", Part 1 "SOIL, sustainable use of soil and reduction of fertilization risks";
2) Subsidies of the Ministry of Agriculture of the Republic of Latvia, project "Influence of minimal soil tillage on its fertility maintenance, development and distribution of pests as well as crops' yield and quality in resowings";
3) Research programme of the Latvia University of Life Sciences and Technologies "Strengthening the science capacity of Latvia university of Life Sciences and Technologies" Project No. Z33 "Productivity of crop rotation depending on winter wheat proportion in it and soil tillage method";
4) European Social Fund project No.8.2.2.0/20/I/001 "LLU Transition to a new funding model of doctoral studies".

I express my gratitude to:

- professor, Dr. habil. agr. Antons Ruža for valuable advice in developing this doctoral thesis, and thanks for the opportunity to work in the project (1);
- professor, Dr. biol. Biruta Bankina for the possibility of joining the project (2) and for possibility of reporting project results at international conferences, as well as on advice and negotiations during the development of the thesis;
- leading researcher, Dr. sc. ing. Jānis Rižikovs for cooperation in the determination of energy value of biomass, as well as for consultations;
- Kristaps Vītols, an expert on the gross cover of the Latvian Rural Advisory Centre, for assisting in the preparation of gross coverages;
- Colleagues from LBTU LPTF RSF "Pēterlauki" during 2016–2020, especially for Linda Litke, Ieva Plūduma-Pauniņa, Merabs Katamadze;
- Professor, Dr. habil. agr. Aldis Kārkliņš for advice and explanations on the accumulation of soil organic carbon in the soil;
- Mg. agr. Ieva Erdberga for the time spent advising on soil organic carbon;
- Professor, Dr. oec. Aina Dobele on valuable advice in assessing the economic significance of results;
- LPKS "Latraps" employees, especially Edīte Konivāle, Līga Ruža and Ginta Briede regarding assistance in obtaining information for economical calculations;
- doc., Dr. agr. Gundega Putniece for advice on the use of agricultural terms;
- doc., Ph. D. Sarmīte Rancāne for assisting in the search for scientific sources on long-term crop rotation trials in Latvia;
- professor, Dr math. Natalija Sergejeva for supporting and motivating the implementation of the project (4);
- my colleague and Dean of the Faculty of Agriculture and Food technology, assoc. professor, Dr. agr. Dace Siliņa for the tolerance and moral support

during preparing my doctoral thesis, thank you for motivation, advice, and trust;
- professor, Dr. agr., Gunita Bimšteine for suggestions and advice on improving the language at thesis;
- colleague Ph. D. Agrita Švarta for advice and motivation during the final stage of the thesis development;
- assoc. prof., Ph. D. Kristaps Kļaviņš for advice and help with English translations;
- graduated students Reinis Lazdāns, Kristaps Lisovskis, Kristaps Zemītis, Edgars Bajinskis for their participation in obtaining trial data;
- Marika Reiha, Latvian language teacher, my aunt, for editing the Latvian language in the thesis and summary;
- my friend Sandis for encouragement and careful review of the thesis.
- family, relatives and friends who supported me and motivated, helped with taking care of my children and also helped in collecting some data.

♥ **The biggest thanks** to my parents **Ināra Misule** and **Guntars Misulis,** sisters **Alise Misule-Briģe** and **Agate Misule,** my darling daughters **Laura and Dārta** and their father **Armands Dargužis** for their patience and support over six years to make this work!