

LIETUVOS AGRARINIŲ IR MIŠKŲ MOKSLŲ CENTRAS

TVIRTINU:

Direktorius

Gintaras Brazauskas

2023 m. lapkričio mėn. 10 d.

**PROJEKTAS ĮGYVENDINTAS PAGAL ŽEMĖS ŪKIO, MAISTO ŪKIO,
ŽUVININKYSTĖS IR KAIMO PLĖTROS 2023–2027 METŲ MOKSLINIŲ TYRIMŲ IR
EKSPERIMENTINĖS PLĖTROS FINANSAVIMO TAISYKLES**

**Biologiškai tvarios ir klimatui palankios augalinės produkcijos maistui ir
pašarams auginimas mažo našumo dirvožemiuose**

Angliškas pavadinimas „Biofortified and climate -resilient food and fodder production on
marginal soils (BioFoodOnMars)“

GALUTINĖ ATASKAITA

Tyrimo vadovas

Dr. Virmantas Povilaitis

LAMMC, Akademija

2023

Pagrindiniai tyrimo vykdytojai

Projekto vadovas	Dr. Virmantas Povilaitis, LAMMC Žemdirbystės instituto Augalų mitybos ir agroekologijos skyriaus vyresnysis mokslo darbuotojas	Projekto veiklos koordinavimas. Lauko bandymų vykdymas, duomenų analizė, ataskaitos rengimas.
Projekto vykdytojai	Dr. Renaldas Žydelis, LAMMC Žemdirbystės instituto Augalų mitybos ir agroekologijos skyriaus mokslo darbuotojas	Lauko bandymų vykdymas, biomasės formavimosi tyrimai, duomenų analizė, ataskaitos rengimas.
	Dr. Eugenija Bakšienė, LAMMC Vokės filialo vyriausioji mokslo darbuotoja	Lauko bandymų vykdymas, biomasės formavimosi tyrimai, duomenų analizė, ataskaitos rengimas.
	Dr. Šarūnas Antanaitis, LAMMC Žemdirbystės instituto Augalų mitybos ir agroekologijos skyriaus vyresnysis mokslo darbuotojas	Laboratorinių bandymų vykdymas, dirvožemio ir augalų kokybės analizė, duomenų analizė, ataskaitos rengimas.
	Dr. Renata Žvirdauskienė, LAMMC Žemdirbystės instituto Mikrobiologijos laboratorijos mokslo darbuotoja.	Laboratorinių bandymų vykdymas, dirvožemio mikroorganizmų tyrimai, duomenų analizė, ataskaitos rengimas.

Projektas vykdomas pagal TMTTV iniciatyvą „Facce Surplus Sustainable and resilient agriculture for food and non-food systems“. Projekte dalyvauja šie užsienio šalių partneriai:

TMTTV projekto koordinadorius	Estonian University of Life Sciences, tel. nr.: +372 7313502, Kreutzwaldi 1A, 51006 Tartu, Estija. El. paštas: evelin.loit@emu.ee
TMTTV projekto įgyvendinime dalyvaujančios institucijos	Warsaw University of Life Sciences, tel. Nr.: 0048 225932628 Nowoursynowska 166, 02-787, Warszawa, Lenkija. El. paštas: wieslaw.szulc@sggw.pl Institut Nationale de la Recherche Agronomique (INRA), tel. nr.: 0033 684727148, University of Bordeaux, Bat B2, allée Geoffroy St-Hilaire, CS50023, 33615 Pessac cedex, Prancūzija. El. paštas: michel.mench@inra.fr U Hasselt, tel. nr.: 0032 11268588, Martelarenlaan 42, 3500 Hasselt, Belgija (Flanders:FWO). El. paštas: Francois.Rineau@uhasselt.be Helmholtz Zentrum Muenchen GmbH, COMI, tel. Nr.: 0049 89 3187 4056, Ingolstadter Landstrasse 1, D-85764, Neuherberg, Voketija. El. paštas: peter.schroeder@helmholtz-muenchen.de Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centras, tel. nr.; +370 347 37193, Instituto al.1, Akademija, LT- 58344, Kėdainių r., Lietuva. El. paštas: lammc@lammc.lt

Turinys

Turinys	3
Įvadas.....	4
1. TYRIMŲ METODIKA.....	6
1.1. Tikslusis lauko eksperimentas.....	6
1.1.1. Lauko eksperimentų agrotechnika.....	9
1.1.2. Vasarinių miežių augalų biometriniai matavimai	12
1.1.3. Mitybos azotu būklės vertinimas.....	12
1.1.4. Dirvožemio morfologija ir jo fizikinės ir agrocheminės savybės	12
1.1.5. Dirvožemio drėgmės ir temperatūros matavimai	12
1.1.6. Bepilotės skraidyklės vasarinių miežių derliaus prognozavimui	13
1.2. Daugiamečių žolynų eksperimentas.....	13
1.3. Augalų ir dirvožemio cheminių analizių atlikimo metodika.....	14
1.4. Dirvožemio mikroorganizmų ekobendrijų fiziologinio profilio vertinimas (angl. community level physiological profiles - CLPP).....	15
1.5. Meteorologinės sąlygos.....	16
1.6. Potencialūs organinių medžiagų atliekų šaltiniai	21
1.7. Tyrimo duomenų statistinė analizė.....	22
2. TYRIMŲ REZULTATAI.....	23
2.1. Vasarinių javų tikslusis lauko eksperimentas.....	23
2.1.1. Dirvožemio rodikliai	23
2.1.2. Dirvožemio drėgmė ir temperatūra	23
2.1.3. Chlorofilo indeksas (SPAD).....	29
2.1.4. Bepilotės skraidyklės derliaus prognozavimui.....	33
2.1.5. Biomasės ir grūdų derlius.....	35
2.1.6. Grūdų kiekybiniai ir kokybiniai rodikliai.....	40
2.1.7. Cheminė biomasės sudėtis.....	43
2.2. Daugiamečių žolynų produktyvumas ir kokybiniai rodikliai.....	56
2.3. Dirvožemio mikroorganizmų aktyvumas	61
IŠVADOS	66
Literatūros sąrašas.....	67
Projekto viešinimas	68
Priedai.....	70

Ivadas

Didėjanti žmonijos populiacija ir besikeičiantis klimatas tampa iššūkiu žemės ūkiui. Prognozuojama, kad iki 2050 m. pasaulio gyventojų skaičius viršys 9 milijardus, todėl maisto gamybą reikės padidinti $\approx 70\text{--}85\%$ (Dhankher ir Foyer., 2018), tuo pačiu užtikrinant maisto tiekimo stabilumą ir kokybinį saugumą. Žvelgiant Europos mastu žemės ūkio veiklai tinkamos žemės yra nedaug, todėl labai svarbu nenaudojamos, mažo našumo žemės ūkio naudmenas įtraukti į žemės ūkio produkcijos gamybos ciklą (Schröder ir kt., 2018). Vis dažniau ir garsiau pradedama kalbėti apie mažėjančią ariamojo dirvožemio našumą ir progresuojančius klimato pokyčius, todėl reikia ieškoti naujų galimybių kaip padidinti maisto ir pašarinių kultūrų kiekį, tuo pačiu nepamirštant ir kokybės, nes, pavyzdžiui, seleno suvartojimas Europoje nesiekia optimalios ribos (Stoffaneller ir Morse, 2015). Tad vienas iš projekto tikslų yra pasiūlyti naujus sprendimus, skirtus padidinti maisto ir pašarinių augalų kiekį ir kokybę, paskatinti tvarų augalininkystės plėtojimą ir pagerinti agroekosistemų atsparumą klimato pokyčiams.

Projekto metu siekiama įvertinti galimus pasėlių derlingumo pokyčius mažo derlingumo dirvožemiuose, augalų auginimo technologijas papildant biotrašomis ar įvairiais organinės kilmės priedais, tokiais kaip silicis. Manoma, kad papildžius žemės ūkio augalų auginimo technologijas tręšimu siliciu, bus galima padidinti pasėlių atsparumą biotiniams ir abiotiniams stresams, pasiekti didesnę augalų produktyvumo lygį. Moksliniai tyrimai parodė, kad silicis sausros sąlygomis gali pagerinti augalų vandens balansą (Zhu ir Gong, 2014), paskatinti maistinių medžiagų asimiliaciją (Alsaeedi ir kt., 2019; Artyszak ir kt., 2019), švelninti augalų patogenų žalą (Debona ir kt., 2017).

Taip pat svarbu atkreipti dėmesį į šalutinę žemės ūkio produkciją, kurioje yra didelė dalis neišnaudotų biomasės kiekių. Tokia biomasė, taikant įvairius konversijos metodus, gali būti panaudojama bioenergijos ar bioproduktų išgavimui, o galutiniame etape virsti organine trąša, kuri būtų naudojama mažo našumo dirvožemio pagerinimui. Dėl to galima didinti energijos balanso efektyvumą, mažinti CO₂ išmetimus ir padidinti dirvožemio organinių medžiagų kiekį (anglies sekvestracija) (Gontard ir kt., 2018). Aplinkoje, tuo pačiu ir dirvožemyje, veiklą vykdo įvairūs mikroorganizmai, tačiau neretai tyrimuose jų aktyvumas ir veikla sulaukia mažiau dėmesio. O juk su mikrobus aktyvumu siejasi ir anglies, azoto ir kitų dirvožemyje esančių elementų kiekio kaupimasis, pokyčiai ir prieinamumas augalams.

Projekto tikslas yra padidinti potencialų augalų derlingumą ir sukurti augalinės produkcijos pridėtinę vertę mažo našumo dirvožemiuose skirtingose Europos agroklimatinėse zonose, naudojant augalų kokybę ir produktyvumą didinančius pagerinimo priedus – seleną ir silicį, dirvožemį praturtinant įvairiomis biologinės kilmės trąšomis (įvairūs kompostai ir pan.). Projekto metu siekiama sukurti šiuolaikines valdymo priemones, kurios leistų tvariai intensyvuoti žemės ūkį ir būtų parankios agroverslui, ūkininkams ir kitiems suinteresuotiems naudotojams.

Tiriamieji projekto objektai: augalai – vasariniai miežiai (2020 ir 2021 m.), sėjamosios avižos (2022 m.), žieminiai rugiai (2023 m.) daugiamečiai žolynai, mažo našumo dirvožemis.

Tyrimo uždaviniai:

1 uždavinys. Biomasės potencialo didinimas ir dirvožemio agrocheminių savybių pagerinimas mažo našumo dirvožemiuose, taikant įvairias tręšimo technologijas su skirtingos kilmės trąšomis.

2 uždavinys. Naudojant inovatyvias technologijas, padidinti dirvožemio organinės medžiagos kiekį, įvertinti dirvožemio mikrobiotos pokyčius ir sukurti nuotolines žemės naudojimo, augalų biomasės ir derlingumo modeliavimo sąsajas. Įvertinti anglies pokyčius mažo našumo dirvožemyje per projekto vykdymo laikotarpį, susiejant su projekte numatytų organinių trąšų panaudojimu ir technologijų taikymu.

3 uždavinys. Identifikuoti galimus organinių medžiagų atliekų šaltinius, kiekius ir galimybes panaudoti organinių trąšų gamybai. Šis uždavinys įgyvendinamas trimis etapais: (a) informacijos rinkimas apie galimus organinių atliekų kiekius; (b) iš populiariausių organinių atliekų gaminami kompostai/biologinės kilmės trąšos ir (c) gautų kompostų/trąšų efektyvumas įvertinamas tiksliuosiuose lauko eksperimentuose mažo našumo dirvožemiuose (vertinami kiekybiniai ir kokybiniai augalų produktyvumo rodikliai).

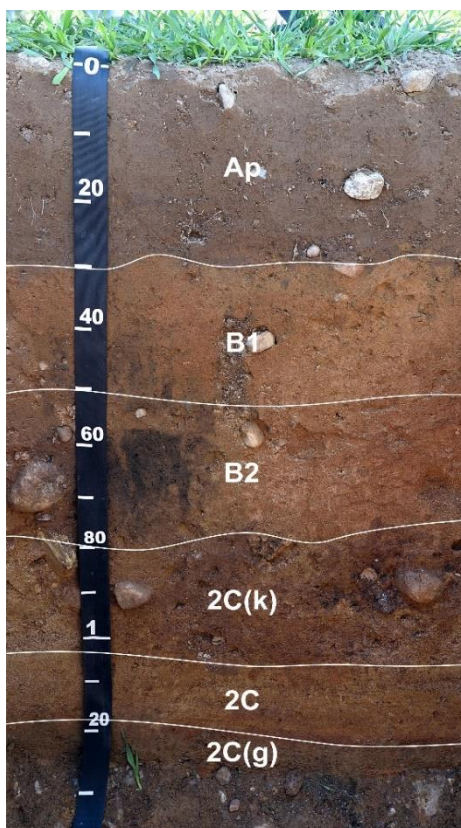
4 uždavinys. Padidinti gaunamos augalinės produkcijos vertę panaudojant seleno ir silicio produktus, sukuriant šių produktų panaudojimo technologiją konkrečioms agroklimatinėms sąlygoms.

1. TYRIMŲ METODIKA

1.1. Tikslusis lauko eksperimentas

Suderinus su užsienio projekto partneriais, tikslieji lauko eksperimentai 2020 ir 2021 metais vykdyti vasarinių miežių „Fantex“ ir daugiamečių žolynų pasėliuose. 2022 metais augintos sėjamosios avižos „Symphony“. 2023 metais tikslieji lauko eksperimentai vykdyti žieminių rugių „VB Duoniai“ pasėlyje, ir pakartotas eksperimentas daugiamečiuose žolynuose. Vasarinių miežių ir sėjamųjų avižų veislės pasirinktos dėl galimybės jas rinkoje įsigyti daugeliui projekto partnerių, taip išlaikant veislės vienodumo faktorius skirtingose agroklimatinėse sąlygose. Minėti migliniai javai pasirinkti kaip vieni universalių žemės ūkio augalų, kurie gali būti naudojami tiek maisto, tiek pašarų pramonės poreikiams tenkinti.

Tikslusis lauko eksperimentas įrengtas 2020 m. LAMMC Vokės filiale (54°37' Š, 25°06' R). Pagal Köppen'o klimato klasifikaciją (Kottek ir kt., 2006), tyrimo vietovės klimatas klasifikuojamas kaip *Dfb* – drėgnas kontinentinis su šiltomis vasaromis, tačiau gana šaltais žiemos periodais. Vidutinė metinė oro temperatūra yra 6,7 °C, vidutinis kritulių kiekis – 685 mm (vidurkis per 30 metų laikotarpį, t. y. nuo 1981 m. iki 2010 m.). Tyrimo vietovėje vyrauja pasotintas paprastasis smėlžemis (SDp-b) (LTDK-99); granulimetrinė sudėtis – priesmėlis ant žvirgždo (žr. 1 paveikslą). Dirvožemio ariamojo sluoksnio (0–20 cm) pH_{KCL} yra rūgštus (5,5), jame santykinai mažai organinių medžiagų, tačiau daug augalams pasiekiamo fosforo ir kalio.



1 paveikslas. Tyrimų vietos pasotinto paprastojo smėlžemio (SDp-b) dirvožemio profilis.

Bandymas atliktas taikant klasikinių lauko eksperimentų metodiką, kiekvieną variantą kartojant erdvėje keturis kartus. Pradinis laukelio dydis 4×10 m. (40 m²), eksperimentas įrengtas pagal 1 lentelėje esančią schemą:

1 lentelė. Lauko eksperimento variantai 2020 metais

Variantas	Pavadinimas	Pastabos
1	Kontrolė	
2	N ₁₀₀ P ₈₀ K ₁₄₀	Tik mineralinės trąšos.
3	N ₁₀₀ P ₈₀ K ₁₄₀ + Se	Papildomai purkšta selenu. Seleno (Forter) norma 0,5 l/ha, purškiama du kartus – krūmijimosi ir bamblėjimo tarpsniais.
4	N ₁₀₀ P ₈₀ K ₁₄₀ + Si	Papildomai purkšta siliciu. Silicio (OPTYSIL) purškimo norma – 0,5 l/ha. Silicis purškiamas 3 kartus per miežių vegetaciją: 1 kartas – BBCH 21-25; 2 kartas – BBCH 30-33; 3 kartas – BBCH 47-59.

2021 metais, t.y. antraisiais projekto vykdymo metais, tiksliajame lauko eksperimente žemės ūkio augalai auginti taikant išplėstą bandymų schemą, papildomai įrengiant variantus su organinėmis ir mineralinėmis trąšomis (žr. 2 lentelę).

2 lentelė. Lauko eksperimento tyrimų schema 2021 metais.

Variantas	Pavadinimas	Pastabos
1	Kontrolė	
2	N ₁₀₀ P ₈₀ K ₁₄₀	Tik mineralinės trąšos.
3	N ₁₀₀ P ₈₀ K ₁₄₀ + Se	Papildomai purkšta selenu. Seleno (Forter) norma 0,5 l/ha, purškiama du kartus – krūmijimosi ir bamblėjimo tarpsniais.
4	N ₁₀₀ P ₈₀ K ₁₄₀ + Si	Papildomai purkšta siliciu. Silicio (OPTYSIL) purškimo norma – 0,5 l/ha. Silicis purškiamas 3 kartus per miežių vegetaciją: 1 kartas – BBCH 21-25; 2 kartas – BBCH 30-33; 3 kartas – BBCH 47-59.
5	N ₆₀ P ₃₅ K ₆₀	Tik mineralinės trąšos.
6	N ₆₀ P ₃₅ K ₆₀ + Se	Papildomai purkšta selenu. Seleno (Forter) norma 0,5 l/ha, purškiama du kartus – krūmijimosi ir bamblėjimo tarpsniais.
7	N ₆₀ P ₃₅ K ₆₀ + Si	Papildomai purkšta siliciu. Silicio (OPTYSIL) purškimo norma – 0,5 l/ha. Silicis purškiamas 3 kartus per miežių vegetaciją: 1 kartas – BBCH 21-25; 2 kartas – BBCH 30-33; 3 kartas – BBCH 47-59.
8	Komposto granulės (N170)	
9	Komposto granulės (N 170) + Se	Papildomai purkšta selenu. Seleno (Forter) norma 0,5 l/ha, purškiama du kartus – krūmijimosi ir bamblėjimo tarpsniais.
10	Komposto granulės (N 170) + Si	Papildomai purkšta siliciu. Silicio (OPTYSIL) purškimo norma – 0,5 l/ha. Silicis purškiamas 3 kartus per miežių vegetaciją: 1 kartas – BBCH 21-25; 2 kartas – BBCH 30-33; 3 kartas – BBCH 47-59.
11	Komposto granulės (N120) + 30kg N mineralinių trąšų	

12	Komposto granulės (N120) +30kg N mineralinių trąšų + Se	Papildomai purkšta selenu. Seleno (Forter) norma 0,5 l/ha, purškiama du kartus – krūmijimosi ir bamblėjimo tarpsniais.
13	Komposto granulės (N120) +30 kg N mineralinių trąšų +Si	Papildomai purkšta siliciu. Silicio (OPTYSIL) purškimo norma – 0,5 l/ha. Silicis purškiamas 3 kartus per miežių vegetaciją: 1 kartas – BBCH 21-25; 2 kartas – BBCH 30-33; 3 kartas – BBCH 47-59.

2022 metais projekto partnerių sutarimu tiksliajame lauko eksperimente augintos avižos pagal tokią bandymų schemą (žr. 3 lentelę):

3 lentelė. Sėjamųjų avižų lauko eksperimento tyrimų schema 2022 metais.

Variantas	Pavadinimas	Pastabos
1	Kontrolė	Netręšta.
2	N75 P60 K100	
3	N75 P60 K100 + Se	Papildomai purkšta selenu. Seleno (Forter) norma 0,5 l/ha, purškiama du kartus – krūmijimosi ir bamblėjimo tarpsniais.
4	N75 P60 K100 +Si	Papildomai purkšta siliciu. Silicio (OPTYSIL) purškimo norma – 0,5 l/ha. Silicis purškiamas 3 kartus per avižų vegetaciją: 1 kartas – BBCH 21-25; 2 kartas – BBCH 30-33; 3 kartas – BBCH 47-59.
5	Komposto granulės (N100)	
6	Komposto granulės (N100) + Se	Papildomai purkšta selenu. Seleno (Forter) norma 0,5 l/ha, purškiama du kartus – krūmijimosi ir bamblėjimo tarpsniais.
7	Komposto granulės (N100) +Si	Papildomai purkšta siliciu. Silicio (OPTYSIL) purškimo norma – 0,5 l/ha. Silicis purškiamas 3 kartus per avižų vegetaciją: 1 kartas – BBCH 21-25; 2 kartas – BBCH 30-33; 3 kartas – BBCH 47-59.
8	Komposto granulės (N100) + 30 kg N mineralinių trąšų	
9	Komposto granulės (N100) +30 kg N mineralinių trąšų + Se	Papildomai purkšta selenu. Seleno (Forter) norma 0,5 l/ha, purškiama du kartus – krūmijimosi ir bamblėjimo tarpsniais.
10	Komposto granulės (N100) +30 kg N mineralinių trąšų +Si	Papildomai purkšta siliciu. Silicio (OPTYSIL) purškimo norma – 0,5 l/ha. Silicis purškiamas 3 kartus per avižų vegetaciją: 1 kartas – BBCH 21-25; 2 kartas – BBCH 30-33; 3 kartas – BBCH 47-59.

2022 m. rudenį – 2023 metais eksperimentas su žieminiais rugiais vykdytas pagal 4 lentelėje pateiktą bandymų schemą.

4 lentelė. Žieminių rugių lauko eksperimento tyrimų schema 2023 metais.

Variantas	Pavadinimas	Pastabos
1	Kontrolė	Netręšta.
2	N75 P60 K100	
3	N75 P60 K100 + Se	Papildomai purkšta selenu. Seleno (Forter) norma 0,5 l/ha, purškiama du kartus – krūmijimosi ir bamblėjimo tarpsniais.
4	N75 P60 K100 +Si	Papildomai purkšta siliciu. Silicio (OPTYSIL) purškimo norma – 0,5 l/ha. Silicis purškiamas 3 kartus per vegetaciją: 1 kartas – BBCH 21-25; 2 kartas – BBCH 30-33; 3 kartas – BBCH 47-59.
5	Komposto granulės (N100)	
6	Komposto granulės (N100) + Se	Papildomai purkšta selenu. Seleno (Forter) norma 0,5 l/ha, purškiama du kartus – krūmijimosi ir bamblėjimo tarpsniais.
7	Komposto granulės (N100) + Si	Papildomai purkšta siliciu. Silicio (OPTYSIL) purškimo norma – 0,5 l/ha. Silicis purškiamas 3 kartus per vegetaciją: 1 kartas – BBCH 21-25; 2 kartas – BBCH 30-33; 3 kartas – BBCH 47-59.
8	Komposto granulės (N100) + 45 kg N mineralinių trąšų	
9	Komposto granulės (N100) + 45 kg N mineralinių trąšų + Se	Papildomai purkšta selenu. Seleno (Forter) norma 0,5 l/ha, purškiama du kartus – krūmijimosi ir bamblėjimo tarpsniais.
10	Komposto granulės (N100) + 45 kg N mineralinių trąšų + Si	Papildomai purkšta siliciu. Silicio (OPTYSIL) purškimo norma – 0,5 l/ha. Silicis purškiamas 3 kartus per vegetaciją: 1 kartas – BBCH 21-25; 2 kartas – BBCH 30-33; 3 kartas – BBCH 47-59.

1.1.1. Lauko eksperimentų agrotechnika

Žieminiai rugiai. 2022 m. spalio pirmą dešimtadienį pasėti žieminiai rugiai „VB Duoniai“, sėklos norma – 180 kg/ha. Ši veislė pasižymi geromis žiemkentiškumo savybėmis ir atsparumu ligoms ir tai leidžia sumažinti pesticidų naudojimą. 2023 m. balandžio antrąją dekadą rugiai patręšti pagal suplanuotą bandymų schemą. Derlius nukultas 2023 m. rugpjūčio antros dekados viduryje.

Sėjamosios avižos. 2022 m. lauko bandymai vykdyti su sėjamosiomis avižomis „Symphony“, kurios pasižymi vidutinio ankstyvumo branda, atsparios išgulimui (žr. 2 paveikslą). Avižos pasėtos gegužės pradžioje, sėjant 260 kg/ha sėklos norma. Mineralinės trąšos ir komposto granulės išbertos prieš avižų sėją ir įterptos. Sėjamosios avižos 2022 m. nukultos rugpjūčio 9 d.. Prieš derliaus nuėmimą surinkti augalų pavyzdžiai biometrinėms ir cheminėms analizėms.



2 paveikslas. Sėjamųjų avižų eksperimentas skirtingais augimo tarpsniai 2022 metais.

Vasariniai miežiai. 2020 ir 2021 metais lauko bandymai vykdyti su vidutinio ankstyvumo vegetacijos veislės KWS Fantex miežiais. Ši veislė sukurta Vokietijoje, KWS Lochow sėklininkystės firmoje. Veislės KWS Fantex miežiai pasižymi tuo, kad yra labai atsparūs išgulimui ir yra derlingesni negu standartinių veislių miežiai.

2020 m. miežiai pasėti balandžio 27 d., sėklos norma – 450 sėklų m^{-2} . Azoto (N50), fosforo (P80), kalio (K140) trąšos pasėliui išbertos prieš sėją, likusios azoto trąšos (N50) panaudotos krūmijimosi tarpsnio metu. Augalų apsaugos produktai, t. y. herbicidai, fungicidai, insekticidai, nebuvo naudojami.

Vasarinių miežių derlius nuimtas 2020 m. rugpjūčio 12 d.. Eksperimentą sudarė 4 variantai, išdėstyti randomizuotai, kartoti keturis kartus (žr. 3 paveikslą), pradinis laukelio plotas – 40 m^2 (ilgis – 10 m, plotis – 4 m). Galutiniam derlingumui nustatyti nukulti visi laukeliai.



3 paveikslas. Vasarinių miežių eksperimento variantų išdėstymas 2020 metais.

2021 m. vasariniai miežiai pasėti gegužės 10 d. taikant išplėstą visų projekto partnerių suderintą eksperimento schemą, sėklos norma 450 sėklų m^{-2} . Prieš vasarinių miežių sėją išbertos mineralinės ir organinės trąšos ir įterptos į dirvožemį. Vasarinių miežių derlius nukultas 2021 m. rugpjūčio 13 d. (žr. 4 paveikslą). Prieš derliaus nukūlimą paimti mėginiai augalų biometrinėms analizėms.



4 paveikslas. Vasarinių miežių lauko eksperimentas mažo našumo dirvožemyje 2021 m., skirtingai vasarinių miežių augimo tarpsniais.

Visais tyrimų metais pasėliuose panaudotos skystos trąšos, turinčios seleno (Forter), kurios purkštos du kartus – krūmijimosi ir bamblėjimo tarpsniais, naudojant $0,5 \text{ l/ha}$ normą. Taip pat papildomam tręšimui panaudotos skystos silicio trąšos (OPTYSIL), kurios naudotos $0,5 \text{ l/ha}$ norma. Silicis purkštas 3 kartus per augalų vegetaciją: 1 kartą – augalams esant BBCH 21–25 tarpsnyje; 2 kartą – BBCH 30–33; 3 kartą – BBCH 47–59.

1.1.2. Vasarinių miežių augalų biometriniai matavimai

Vasarinių miežių vystymosi tarpsniai nustatyti pagal „*BBCH scale*“ metodiką (Meier, 2018), kurioje pagrindiniai vystymosi tarpsniai skirstomi į vegetatyvinius ir reprodukcinis periodus. Tarpsniai registruoti, kai daugiau nei 50 % augalų pasiekė konkretų tarpsnį. Biomasei nustatyti augalų ėminiai atrinkti 5 kartus per vegetaciją (BBCH32, BBCH61, BBCH75, BBCH85, BBCH97-99 tarpsniais), po 10 augalų iš kiekvieno laukelio. Miežiams pasiekus fiziologinę brandą, paimti ėminiai, siekiant nustatyti bendrą antžeminės dalies biomasę. Kiekvienas augalas padalintas į šias pagrindines dalis: lapus, stiebus, pelus ir grūdus. Galutinis grūdų derlius nustatytas iš viso laukelio. Lapų plotas matuotas 5 kartus per vegetaciją, naudojant skaitmeninę programą „WinFOLIA“. Lapų plotas nustatytas tuo pat metu imant imant biomasės ėminius, ir pagal gautus rezultatus apskaičiuotas lapų ploto indeksas.

1.1.3. Mitybos azotu būklės vertinimas

Augalų lapuose chlorofilo indeksas nustatytas spektrofotometru MINOLTA SPAD 502, kuris chlorofilo absorbciją matuoja mėlynųjų (400–500 nm) ir raudonųjų (600–700 nm) bangų diapazone. Iš šių duomenų prietaisas apskaičiuoja skaitmeninę reikšmę, atitinkančią chlorofilo kiekį lapuose, t. y. chlorofilo kiekio indeksą. Bandymuose chlorofilo indekso matavimai atlikti periodiškai.

1.1.4. Dirvožemio morfologija ir jo fizikinės ir agrocheminės savybės

Pirmaisiais tyrimų metais, prieš vasarinių miežių sėją, siekiant įvertinti dirvožemio fizikinių savybių įtaką drėgmės ir temperatūros pasiskirstymui ir režimui, tyrimų vietovėje, vadovaujantis LTDK-99 ir WRB 2014, 2015 metodinėmis nuostatomis, nustatytas dirvožemio tipologinis vienetas ir identifikuota jo morfologija. Dirvožemio agrocheminėms savybėms nustatyti iš visų dirvožemio genetinių horizontų paimti ėminiai ir nustatyti (ISO 10390:2005), organinės anglies sauso deginimo ISO 10694:1195, suminio azoto ISO 11261:1995 (Kjeldahl), judriojo fosforo (Egner-Riehm-Domingo (A-L)), kalio (Egner-Riehm-Domingo (A-L)) kiekiai. Papildomai iš pagrindinių dirvožemio horizontų paimti nesuardytos struktūros ėminiai (vieno ėminio dydis – 250 cm³), jie panaudoti dirvožemio fizikinių savybių (maksimalios dirvožemio drėgmės ir augalų vytimo ribos, augalams pasiekiamo drėgmės kiekio, hidraulinio laidumo, dirvožemio tankumo, agregatų struktūros ir patvarumo ir granulimetrinės sudėties (pipetiniu metodu) nustatymui.

1.1.5. Dirvožemio drėgmės ir temperatūros matavimai

Miglinių javų eksperimente periodiškai atlikti dirvožemio drėgmės (cm³/cm³) ir temperatūros (°C) matavimai. Matavimams panaudota *SoilNet* įranga, kuri dirvožemio profilyje instaliuota į 5 skirtingus dirvožemio genetinius horizontus. 2021 m. įranga instaliuota gegužės 10 d., 2020 m. – gegužės 28 d., 2022 m. gegužės 20 d. Žieminių rugių pasėlyje dėl įrangos specifikos drėgmės pokyčiai matuoti tik šiltuoju vegetacijos periodu, t. y. įranga instaliuota 2023 m. pavasarį. Visais tyrimų metais įranga iškasta po derliaus nuėmimo.

1.1.6. Bepilotės skraidyklės vasarinių miežių derliaus prognozavimui

Bepilotė skraidyklė (dronas – DJI Phantom 4) naudota 6 kartus per vasarinių miežių vegetaciją (BBCH21, BBCH32, BBCH61, BBCH75, BBCH85, BBCH97-99 tarpsniais). Skrydžiai atlikti fiksuotu paros laiku, t.y. nuo 11:00 val. iki 12:00 val. Bepiločio orlaivio užfiksuotos nuotraukos (vieno skrydžio metu ≈ 150), panaudojant programinę įrangą „Agisoft Metashape“ (Agisoft LLC, Danija), sujungtos į vieną aukštos raiškos georeferencinę ortofotografiją. Vėliau atlikta nuotraukų korekcija (nuotraukų išlyginimas, konkrečių eksperimento laukelių aptikimas, trianguliacijos procedūra). Toliau sugeneruotas taškų debesis ir atliekamas georeferencinės ortofotografijos generavimas. Gauta georeferencinė ortofotografija analizuota nemokama QGIS 3.2.1 (QGIS Development Team, USA) atviro kodo tarp platformine geografinės informacijos programine įranga. Visi eksperimento laukeliai (variantai) padalinti ir atskirti, ir kiekvienam jų apskaičiuoti augalų vegetatyviniai indeksai (žr. 5 lentelę), kurie panaudoti prognozuojant vasarinių miežių derlių.

5 lentelė. Augalų vegetatyviniai indeksai, kurie naudojami derliaus prognozėms.

Eil. Nr.	Pavadinimas (angliškas)	Sutrumpinimas	Formulė	Šaltinis
1	Visible Atmospherically Resistant Index	VARI	$(\text{Green} - \text{Red}) / (\text{Green} + \text{Red} - \text{Blue})$	Gitelson ir kt., 2002
2	Triangular Greenness Index	TGI	$(\text{Red} - \text{Blue}) (\text{Red} - \text{Green}) - (\text{Red} - \text{Green}) (\text{Red} - \text{Blue}) / 2$	Raymond Hunt ir kt., 2011
3	Green Leaf Index	GLI	$(\text{Green} - \text{Red} - \text{Blue}) / (2\text{Green} + \text{Red} + \text{Blue})$	Louhaichi ir kt., 2001
4	Excess Green	EXG	$2 \times G - R - B$	Woebbecke ir kt., 1995

1.2. Daugiamečių žolynų eksperimentas

Daugiamečių žolynų bandymas įrengtas LAMMC Žemdirbystės institute. Žolynas įrengtas 2008 m., pasirenkant lengvesnės granulimetrinės sudėties dirvožemį ir naudotas ekstensyviai. Žolyno eksperimentas įrengtas Valinavos ilgalaikiame bandyme, kuris užima daugiau kaip 4 ha ir yra Dotnuvėlės upelio terasinėje aikštelėje (žr. 5 paveikslą), kurios reljefas nėra visiškai lygus: šiaurės vakarų dalis iškilusi, o pietų ir pietvakarių kryptimi žemėja. Siekiant atsakyti į klausimą – kiek gali būti sukaupta biomasės natūraliai augančiame žolyne, panaudoti matavimų duomenys iš kito ilgamečio bandymo – daugiamečių žolynų, kuris įrengtas 1980 m. ir nėra tręšiamas. Žolynuose, kiekvienos pjūties metu (2022 m. ir 2021 m. žolynai pjauti 2 kartus – birželio mėnesio pradžioje ir liepos – rugpjūčio viduryje, 2023 m. – birželio ir spalio mėn., kai tuo metu 2020 m. atliktos 3 pjūtys – birželio mėn. pradžioje, liepos mėn. ir rugsėjo mėn. pradžioje) paimti pavyzdžiai biomasės ir jos cheminės sudėties matavimams. Daugiamečiai žolynai auginti pagal 6 lentelėje pateiktas tręšimo technologijas.

6 lentelė. Daugiamečių žolynų eksperimento variantai 2020 – 2023 metais.

Variantas	Pavadinimas	Pastabos
1	Kontrolė	Netręšiamas
2	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	Tik mineralinės trąšos.
3	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + Se	Papildomai purkšta selenu. Seleno norma 0,5 l/ha, purškiama vegetacijos metu.
4	N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ + Se (Forter)	Papildomai purkšta siliciu. Seleno turinčio produkto (Forter) norma 0,5 l/ha, purškiama vegetacijos metu.



5 paveikslas. Valinavos ilgalaikis lauko eksperimentas.

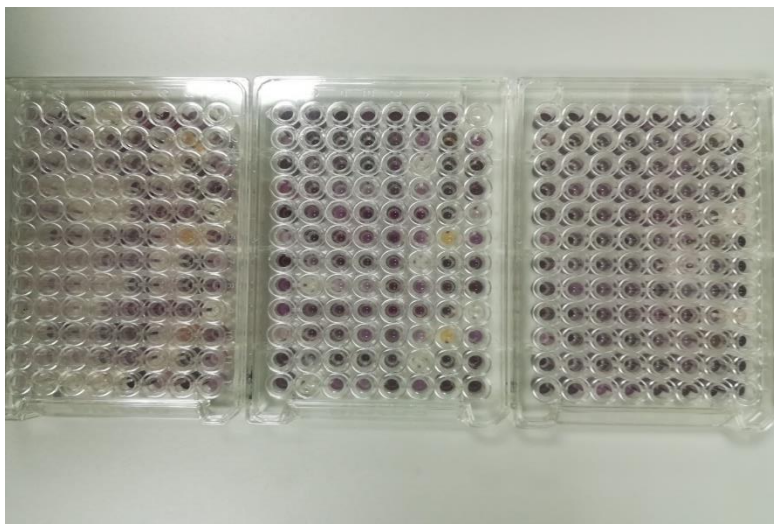
1.3. Augalų ir dirvožemio cheminių analizių atlikimo metodika

Augalų analizės. Augalinės biomasės kokybinės ir kiekybinės analizės atliktos naudojant šiuos metodus: Komisijos reglamentas (EB) Nr. 152/2009 nustatantis oficialiai pašarų kontrolei taikytinus Bendrijos ėminių ėmimo ir analizės metodus. Sausa medžiaga pagal TR (EB) Nr. 152/2009. Organinė medžiaga TR (EB) Nr. 152/2009 organinių medžiagų ir pelenų kiekio nustatymas; Bendras azotas pagal TR (EB) Nr. 152/2009 Bendras fosforas pagal TR (EB) Nr. 152/2009. Bendras kalis pagal LST EN ISO 13650:2006 Dirvožemio gerinimo medžiagos ir auginimo terpės. Karališkajame vandenyje tirpių elementų ekstrahavimas ir LST ISO 9963-3:1998 Vandens kokybė. Natrio ir kalio nustatymas. 3 dalis. Natrio ir kalio nustatymas liepsnos emisijos spektrometriniu metodu. Selenas: LST EN 14627:2005; Silicis: LST EN 14627:2005.

Dirvožemio analizės. Dirvožemyje, kurio ėminiai paimti 0–30 cm sluoksnyje, nustatyta pH, organinė anglis (C_{org}), azoto kiekis, judrusis fosforas (P_2O_5) ir judrusis kalis (K_2O). Dirvožemio cheminėms analizėms taikyti šie metodai: pH nustatytas pagal standartą ISO 10390:2005 (potenciometrinis metodas – 1M KCl ištraukoje); suminio azoto (N_{total}) kiekis nustatytas Kjeldalio metodu (ISO 11261:1995). Judriojo fosforo ir kalio kiekiai dirvožemyje nustatyti Egnerio – Rimo – Domingo metodu (A–L metodu). Organinė anglis (C_{org}) nustatyta organinės anglies analizatoriumi pagal ISO 10694:1995.

1.4. Dirvožemio mikroorganizmų ekobendrijų fiziologinio profilio vertinimas (angl. community level physiological profiles - CLPP)

CLPP analizei naudotos Biolog ekoplokštelės (EcoPlates) su 31 anglies šaltiniu. Biolog sistemos veikimo principas paremtas mikroorganizmų auginimu 96 mikroplokštelių šulinėliuose su skirtingais anglies šaltiniais ir cheminiais junginiais. Kiekvienoje ekoplokštelėje yra 3 anglies šaltinių ir kontrolinių šulinėlių pakartojimai. Naudojant anglies šaltinius iš skirtingų mikroplokštelės šulinėlių, mikroorganizmas kvėpuoja, todėl redukuojasi tetrazolo dažai, esantys kartu su anglies šaltiniais ir šiuose šulinėliuose pasikeičia spalva į violetinę. Galutinis rezultatas – kombinacija nuspalsvintų ir bespalvių šulinėlių (žr. 6 paveikslą). Spalvų pokytis (absorbcija arba vadinamasis optinis tankis – OD) nuskaitymas kaip absorbcija kas 24 valandas naudojant „Microstation“ („MicroLog MSystem“, „Biolog Inc.“) prie 590 nm bangos ilgio 4 dienas iš eilės. Duomenys surenkami naudojant Microlog Data Collection Software 1.2 (Biolog Inc.).



6 paveikslas. Mikroorganizmų aktyvumui nustatymui naudojamos Biolog ekoplokštelės (EcoPlates) analizių metu.

Tyrimo eiga. Po 10 g tiriamo dirvožemio suspenduota 90 ml sterilaus 0,87 % NaCl tirpalo, plakta 1 h orbitinėje purtyklėje, palikta 30 min nusistovėti, tada suspensija praskiesta iki 10^{-2} ir po 100 μ l išpilstyta į kiekvieną ekoplokštelės šulinėlį. Ekoplokštelės inkubuotos 25 °C temperatūroje tamsoje ir

kas 24 val. nuskaitytos fotometru (MicroLog M System, Biolog Inc., Hayward, Calif.) prie 590 nm bangų ilgio 4 paras (iki 96 val.).

Skaičiavimai ir duomenų analizė. Norint įvertinti mikroorganizmų bendrijų pokyčius dirvožemyje ir mikroorganizmų augimo tendenciją, apskaičiuoti: vidutinis substrato spalvos intensyvumas (AWCD), gyvybingumas (R), Shannon įvairovės indeksas (H), Simpsono indeksas (D) ir McIntosh indeksas (U) (žr. 7 lentelę). Minėti indeksai atspindi metabolinę funkcinę mikroorganizmų bendruomenių įvairovę. Mikroorganizmų aktyvumas kiekvienoje ekoplokštelėje išreikštas kaip vidutinis šulinėlių spalvos intensyvumas (angl. average well colour development – AWCD) (Garland and Mills, 1991).

7 lentelė. Indeksų reikšmės ir jų skaičiavimo formulės

Indeksas	Reikšmė	Formulė	Pastaba
AWCD	vidutinis substrato spalvos intensyvumas	$AWCD = \sum (Ci - R)/31$	Laikoma, kad mėginiai, kurių AWCD pokytis yra didesnis, turi didesnę anglies šaltinio panaudojimo pajėgumą ir turi didesnę mikroorganizmų gausą.
R	Gyvybingumas	vertė apskaičiuota kaip panaudotų substratų šulinėlių, kurių OD > 0,25, skaičius	Mikroorganizmų tipų (rūšių) skaičius bendruomenėje
Shannon indeksas	Parodo fiziologinę mikroorganizmų įvairovę pagal technologinę specifiką.	$H = -\sum P_i (\ln P_i)$	Aukštas Šenono indeksas reiškia didesnę funkcinę medžiagų apykaitos įvairovę ir tuo pačiu tolygų skirtingų funkcinių tipų pasiskirstymą.
Simpsono indeksas		$D = \sum (n_i \times (n_i - 1) / (N \times (N - 1)))$	
McIntosh indeksas		$U = \sqrt{\sum n_i^2}$	$n = (Ci - R)$

Kiekvieno šulinėlio optinis tankis (angl. optical density – OD) apskaičiuotas iš substrato šulinėlio OD atėmus kontrolinio (be anglies šaltinio) šulinėlio OD.

1.5 Meteorologinės sąlygos

2020 m. vegetacijos metu vyraavusios meteorologinės sąlygos buvo permainingos: pavasarinės vegetacijos metu – (kovo viduryje – balandžio mėn.) vyravo sausringi orai, stigo drėgmės (žr. 8 lentelę). Drėgmės stygius atsiliepė ir daugiamečių žolynų augimui – derlingumo potencialas buvo ribojamas. Gegužės mėnuo buvo permainingas: didžiąją dalį mėnesio vyravo vėsūs orai, pasitaikė gausesni krituliai, tai buvo palanku augalų vystymuisi – augalai galėjo geriau išnaudoti savo produktyvumo potencialą. Birželis buvo gerokai šiltesnis ir su gausiu kritulių kiekiu, todėl paskatintas

augalų augimas ir vystymasis. Liepos mėnuo buvo permainingas – pradžia drėgna, vėliau šilti orai spartino augalų brendimą, žolynų derėjimą. Šiltas ir sausas laikotarpiai leido vasarinių miežių derlių nuimti sausą ir įprastu laiku.

2020 m. ruduo (spalis, lapkritis) buvo gerokai šiltesnis nei klimatinė norma. Spalio mėnesį kritulių kiekis buvo artimas daugiamečiai klimatinei normai. Lapkričio ir gruodžio mėnesiais vyravo aukštesnės temperatūros ir buvo mažesnis kritulių kiekis nei turėtų būti įprastai. 2021 m. sausio mėnesį vyravo neigiamos temperatūros ir susiformavo sniego danga, tačiau sniego sluoksnis susidarė ant neišalusios dirvos. Vasario I ir II dešimtadienius vyravo žemiški orai – temperatūra buvo žemesnė nei klimatinė norma, tačiau III dešimtadienį orai gerokai sušilo ir temperatūra buvo aukštesnė nei klimatinė norma, o mėnesio gale sniego danga ištirpo. Kovo mėnuo buvo permainingas – nors temperatūra ir buvo aukštesnė nei klimatinė norma, tačiau vyravo neigiamos temperatūros ir vėjuoti orai. Balandžio I ir III dekadose buvo vėsesnės nei įprastai, o kritulių kiekis nesiekė klimatinės normos. Gegužės mėnuo buvo vėsus ir gausus kritulių, tai šiek tiek sunkino vasarinių javų sėją, nors daugiamečių žolynų vegetacijai tokios sąlygos buvo palankios. Tačiau birželio mėn. temperatūra buvo aukštesnė, o kritulių stigo, ir viršutiniuose dirvožemio sluoksniuose ėmė stigti drėgmės. Liepos mėnesį padėtis tapo dar kritiškesnė – vyravo karšti orai, dirvožemyje esančios drėgmės atsargos išseko ir augalai tiesiog ėmė džiūti. Derliaus nuėmimas prasidėjo laikotarpiu artimu daugiamečiam, tačiau birželio liepos mėn. sąlygos neigiamai paveikė augalų produktyvumą. 2021 m. pavasario laikotarpiu (balandžio – gegužės mėn.) meteorologinės sąlygos buvo palankios daugiamečių žolynų augimui, tačiau sausi ir karšti orai birželio ir liepos mėn. limitavo žolynų produktyvumo potencialo išnaudojimą, o gausūs krituliai rugpjūtį negalėjo kompensuoti prasto biomasės prieaugio.

2022 m. pavasaris buvo permainingas – kovas neįprastai sausas, balandis šiltesnis, o lietaus gausiau buvo mėnesio pabaigoje. Gegužės mėnesį vyravo vėsesni nei įprasta orai, o kritulių II ir III dešimtadieniais sulaukta gausiau nei įprastai. Birželis kontrastingas - I ir II dešimtadieniais sulaukta gausesnių kritulių, o temperatūra buvo artima vidurkiui, tačiau III dešimtadienis buvo gerokai šiltesnis nei daugiametis vidurkis ir sausesnis, ir tai skatino augalų vystymosi procesus. Liepos mėnuo prasidėjo sausais ir su aukštesne temperatūra nei įprastai, orais. Aukštesnės temperatūros spartina augalų vystymąsi, o tai neigiamai veikia augalų produktyvumo potencialo išnaudojimą.

2022 m. rudens periodas buvo sausesnis nei įprastai, o gruodžio mėn. šaltesnis nei klimatinė norma. Tačiau 2023 m. žiemos periodas buvo su švelnesnėmis temperatūromis nei klimatinė norma, o kritulių pavasario laikotarpiu buvo mažiau nei įprastai, bet nuo balandžio trečios dekados prasidėjo sausringas periodas – gegužės mėnesį kritulių buvo daugiau kaip 5 kartus mažiau nei klimatinė norma. Sausra tesėsi ir birželio mėn., o mėnesio vidutinė temperatūra buvo aukštesnė už klimatinę normą. Aukštesnė temperatūra ir kritulių stygius tampa pagrindiniais veiksniais limituojančiais augalų produktyvumo potencialo realizavimą vegetacijos metu.

8 lentelė. Meteorologiniai duomenys, fiksuoti 2020 - 2022 metais.

Mėnuo	Dekada	Oro temperatūra, °C		Krituliai, mm	
		Dekados	Standartinė klimatinė norma	Dekados	Klimatinės norma
2020 m.					
Sausis	Vidurkis	2,7	-5,5	52,2	30.6
	I	2,1		13,2	
	II	3,3		24,6	
	III	2,8		14,4	
Vasaris	Vidurkis	2,3	-4,6	47,3	25.7
	I	1,6		19,7	
	II	3,1		15,3	
	III	2,1		12,3	
Kovas	Vidurkis	3,5	-0,8	31,7	27.9
	I	4,6		15,2	
	II	4,2		16,2	
	III	1,9		0,3	
Balandis	Vidurkis	6,8	5,6	9,4	36,8
	I	6,4		6,3	
	II	5,5		3,1	
	III	8,6		0,0	
Gegužė	Vidurkis	10,6	12,3	50,1	52,2
	I	10,8		17,5	
	II	8,1		23,4	
	III	12,8		9,2	
Birželis	Vidurkis	18,9	15,8	156,9	62,3
	I	15,8		57,6	
	II	19,8		45,3	
	III	21,2		63,0	
Liepa	Vidurkis	17,4	17,0	65,6	74,7
	I	16,8		46,9	
	II	18,2		0,5	
	III	17,2		18,2	
Rugpjūtis	Vidurkis	18,5	16,3	47,7	74,2
	I	19,8		7,1	
	II	18,9		12,8	
	III	17,0		27,8	
Rugsėjis	Vidurkis	15,0	11,8	14,8	51,1
	I	15,1		9,2	
	II	14,2		5,4	
	III	15,5		0,2	
Spalis	Vidurkis	10,2	6,9	49,4	49,6
	I	13,3		3,5	
	II	7,2		28,9	
	III	10,2		17,0	
Lapkritis	Vidurkis	5,3	1,7	33,3	44,7
	I	7,5		5,0	
	II	5,4		17,2	
	III	3,0		11,	
Gruodis	Vidurkis	0,6	-2,5	24,4	37,6
	I	-0,6		0	
	II	0,9		7,3	
	III	1,3		17,1	

2021 m.					
Sausis	Vidurkis	-3,6	-5,5	49,4	30,6
	I	-1,3		13,5	
	II	-9,5		7,3	
	III	-0,2		28,6	
Vasaris	Vidurkis	-5,9	-4,6	2,2	25,7
	I	-9,3		0,8	
	II	-9,7		1,4	
	III	3,0		0,0	
Kovas	Vidurkis	1,9	-0,8	16,3	27,9
	I	-0,2		1,0	
	II	0,9		9,5	
	III	4,7		5,8	
Balandis	Vidurkis	6,4	5,6	26,4	36,8
	I	3,5		12,9	
	II	10,1		4,0	
	III	5,6		9,5	
Gegužė	Vidurkis	11,4	12,3	100,9	52,2
	I	7,8		33,1	
	II	14,5		33,2	
	III	11,9		34,6	
Birželis	Vidurkis	19,6	15,8	30,1	62,3
	I	18,1		2,4	
	II	18,6		5,5	
	III	22,2		22,2	
Liepa	Vidurkis	22,8	17,0	21,4	74,7
	I	23,2		9,1	
	II	24,3		5,9	
	III	21,1		6,1	
Rugpjūtis	Vidurkis	16,3	16,3	150,8	74,2
	I	17,3		31,8	
	II	17,1		63,1	
	III	14,6		55,9	
Rugsėjis	Vidurkis	11,7	11,8	28,2	51,1
	I	13,4		1,3	
	II	11,9		15,6	
	III	9,6		11,3	
Spalis	Vidurkis	8,1	6,9	35,0	49,6
	I	9,3		4,3	
	II	6,8		9,8	
	III	8,0		20,9	
Lapkritis	Vidurkis	3,9	1,7	87,9	44,7
	I	5,9		35,5	
	II	4,4		16,7	
	III	1,4		35,7	
Gruodis	Vidurkis	-3,6	-2,5	23,7	37,6
	I	-5,6		9,4	
	II	1,0		10,8	
	III	-6,0		3,5	
2022 m.					
Sausis	Vidurkis	-0,2	-5,5	35,4	30,6
	I	-0,3		17,6	
	II	-0,4		6,2	
	III	-0,5		11,6	
Vasaris	Vidurkis	1,1	-4,6	49,9	25,7

	I	-0,2		11,2	
	II	2,2		28,5	
	III	1,5		10,2	
Kovas	Vidurkis	1,8	-0,8	2,9	27,9
	I	-0,5		2,9	
	II	1,7		0,0	
	III	3,8		0,0	
Balandis	Vidurkis	6,0	5,6	53,6	36,8
	I	3,2		17,1	
	II	6,7		3,5	
	III	8,0		33,0	
Gegužē	Vidurkis	10,9	12,3	78,5	52,2
	I	9,3		1,7	
	II	11,3		11,9	
	III	11,9		64,9	
Birželis	Vidurkis	17,4	15,8	151,5	62,3
	I	15,9		56,5	
	II	15,3		81,6	
	III	20,9		13,4	
Liepa	Vidurkis	17,9	17,0	96,8	74,7
	I	18,7		9,7	
	II	16,4		44,6	
	III	18,6		42,5	
Rugpjūtis		20,7	16,3	43,2	74,2
	I	18,3		42,0	
	II	22,8		0,0	
	III	21,0		1,7	
Rugsējis	Vidurkis	10,6	11,8	28,8	51,1
	I	10,9		2,1	
	II	11,1		16,4	
	III	9,8		10,3	
Spalis	Vidurkis	9,8	6,9	19,2	49,6
	I	10,0		4,2	
	II	9,6		11,6	
	III	9,9		3,4	
Lapkritis	Vidurkis	2,8	1,7	25,5	44,7
	I	7,7		14,6	
	II	2,6		2,8	
	III	-1,9		8,1	
Gruodis	Vidurkis	-3,1	-2,5	42,6	37,6
	I	-3,4		9,0	
	II	-6,9		17,3	
	III	0,8		16,3	
2023 m.					
Sausis	Vidurkis	0,3	-5,5	52,1	30,6
	I	-0,5		29,8	
	II	2,3		19,3	
	III	-0,8		3,0	
Vasaris	Vidurkis	-0,3	-4,6	20,1	25,7
	I	-1,1		3,7	
	II	1,4		12,9	
	III	-1,2		3,5	
Kovas	Vidurkis	2,5	-0,8	37,3	27,9
	I	-0,9		8,3	
	II	2,7		13,8	

	III	5,3		15,2	
Balandis	Vidurkis	8,3	5,6	28,7	36,8
	I	5,2		9,4	
	II	10,1		15,2	
	III	10,1		4,1	
Gegužė	Vidurkis	12,7	12,3	9,6	52,2
	I	8,0		0,0	
	II	14,3		9,6	
	III	15,4		0,0	
Birželis	Vidurkis	17,4	15,8	33,5	62,3
	I	14,6		4,3	
	II	18,5		13,9	
	III	19,2		15,3	
Liepa	Vidurkis	17,7	17,0	48,7	74,7
	I	17,1		21,0	
	II	18,9		7,5	
	III	17,1		20,2	
Rugpjūtis	Vidurkis	19,9	17,0	96,2	74,2
	I	18,9		39,0	
	II	21,7		0,8	
	III	19,0		56,4	

Derliaus prognozėms kurti sudarytos meteorologinių duomenų įvestys apima šiuos kasdieninius meteorologinius rodiklius: maksimali, minimali ir vidutinė temperatūra, kritulių kiekis, santykinis drėgnumas, vėjo greitis, saulės radiacija, gaunami iš artimiausių meteorologinių stočių, kurios priklauso Lietuvos hidrometeorologijos tarnybai prie Aplinkos ministerijos. Tyrimų metu gauti meteorologiniai duomenys palyginti su 30-ies metų (1981–2010 m.) klimato normos vidurkiu.

1.6. Potencialūs organinių medžiagų atliekų šaltiniai

Vienas iš projekto uždavinių yra įvertinti galimus organinių medžiagų šaltinius, iš kurių būtų galima pagaminti organinės kilmės medžiagas, kurios galėtų būti panaudotos dirvožemio derlingumo gerinimui. Remiantis Aplinkos apsaugos agentūros pateikiamomis atliekų susidarymo suvestinėmis (2018 m.), per metus Lietuvoje susidaro daugiau kaip 6,77 milijono tonų įvairių atliekų. Tačiau didžioji dalis jų gali būti perdirbama, o kelių grupių atliekoms taikant įvairius perdirbimo būdus (kompostavimą, biodujų išgavimą ir t.t.), jas galima paversti organiniu tręšimo produktu, kuris galėtų būti naudojamas kaip trąša mažo našumo dirvožemio savybėms gerinti (žr. 9 lentelę).

Atsižvelgiant į tai, kiek ir kokių atliekų kiekvienoje projekto partnerių šalyje susidaro, iš kurių būtų galima padaryti tręšimo produktą, skirtą pagerinti dirvožemio savybes, priimtas sprendimas gaminti kompostą iš šių sudedamųjų dalių: grybų auginimui naudoto substrato (48 %), organinių atliekų (33 %), žaliųjų atliekų (12 %) ir pjuvenų (7 %). Kad būtų užtikrintas vienodos kokybės komposto pagaminimas visiems projekto partneriams, komposto gamyba patikėta projekto partneriams iš Lenkijos (Varšuvos gamtos mokslų universitetas).

9 lentelė. Potencialūs organinės kilmės atliekų kiekiai Lietuvoje (remiantis AAA duomenimis, 2018 m.).

Atliekų pavadinimas		Susidaręs kiekis, t	Perdirbamas kiekis, t
Biologiškai suyrančios atliekos:	Žaliosios atliekos	119 506	87 383
	Įvairios maisto gaminimo ir maisto produktų atliekos	5602	5562
	Augalinės maisto gaminimo ir maisto produktų atliekos	19190	18148
Mediena	Medienos atliekos	3095	1386
	Kitos medienos	3341	2322
	Medžio žievės ir medienos atliekos	513	316
	Pjuvenos, drožlės, skiedros, mediena,	20 740	16 579
Miškininkystės atliekos	Žaliosios atliekos	495	476
Gyvulių ekskrementai, šlapimas ir mėšlas (įskaitant panaudotus šiaudus), srutos, atskirai surinkti ir tvarkomi už susidarymo vietas		22029	21609

Pagamintas kompostas į dirvožemį įterptas 2021 m. pavasarį, pagal numatytą bandymų metodiką, ir reikalingas maisto medžiagų normas apskaičiuojant pagal „Tręšimo plano“, rekomendacijas atitinkamai 13 t/ha ir 9,3 t/ha. Komposte esančio azoto kiekiai atitiko N170 ir N120 normas. 2022 m. avižų tręšimui kompostu pasirinktas N100 azoto lygmuo, patenkantis su kompostu. Toks lygmuo parinktas po diskusijos su projekto partneriais, dėl to, kad maisto medžiagos iš organinių trąšų atsipalaiduoja palaipsniui, t. y. pirmaisiais metais į dirvožemį patenka apie 25 % komposte esančių maisto medžiagų. Organinių trąšų mineralizaciją lemia ne tik tokių trąšų kilmė, bet ir aplinkos sąlygos: dirvožemio drėgmė, temperatūra, dirvožemio agrocheminės ir fizikinės savybės.

1.7. Tyrimo duomenų statistinė analizė

Esminiai skirtumai tarp variantų nustatyti Tukey's testu, taikant 95 % patikimumo lygmenį. Koreliaciniai ryšiai įvertinti tiesinės regresijos lygtimis. Statistinis duomenų įvertinimas atliktas statistine programa *SAS 9.4* (SAS Institute, 2016).

2. TYRIMŲ REZULTATAI

2.1. Vasarinių javų tikslusis lauko eksperimentas

2.1.1. Dirvožemio rodikliai

Tiksliojo lauko eksperimento pradžioje (2020 m.) aprašytas dirvožemio profilis, tipingas tyrimų vietai. Granulimetrinė sudėtis parodė, kad pagrindinė dirvožemio sudėtinė dalis – smėlis (žr. 10 lentelę). Ariamasi sluoksnis (0–30 cm) turi rūgštėjimo tendenciją, giliau pH didėja, organinės anglies ir mikroelementų gilesniuose sluoksniuose mažėja (žr. 11 lentelę).

10 lentelė. Tyrimų vietos dirvožemio granulimetrinė sudėtis profilyje (0–120 cm).

Dirvožemio horizontas	Dirvožemio tekstūra					
	Smėlis	Smulkios dulkės	Vidutinės dulkės	Dulkės	Molis	Šiurkščioji frakcija
Ap (0–0,30 m)	45,23	4,04	11,18	29,01	10,54	-
B1 (0,30–0,50 m)	88,01	0,86	2,07	4,49	4,57	5,10
B2 (0,50–0,78 m)	81,86	1,32	3,45	6,64	6,73	14,80
2 C (k) (0,78–1,05 m)	90,90	0,75	2,15	3,01	3,19	24,70
2 C (1,05–1,20 m)	95,41	0,10	1,20	1,60	1,69	3,30

11 lentelė. Tyrimų vietos dirvožemio agrocheminė sudėtis dirvožemio profilyje (0–120 cm), Trakų Vokė, 2020 m..

Dirvožemio horizontas	Tekstūra	C _{org}	pH	N _{bendras}	P ₂₀₅	K ₂₀
				%	mg/kg	mg/ kg
Ap (0–0,30 m)	Smėlingas priemolis	1,34	5,5	0,103	170	164
B1 (0,30–0,50 m)	Smėlis	0,46	5,9	0,014	121	154
B2 (0,50–0,78 m)	Smėlingas priemolis	0,54	6,5	0,015	259	123
2 C (k) (0,78–1,05 m)	Smėlis	0,37	7,6	0,003	195	44
2 C (1,05–1,20 m)	Smėlis	0,29	7,6	0,004	209	38

2.1.2. Dirvožemio drėgmė ir temperatūra

2020 m. vasarinių miežių vegetacijos metu dirvožemio drėgmė Ap horizonte vidutiniškai variavo nuo 5,30 iki 13,53 cm/cm⁻³, B1 horizonte – nuo 5,64 iki 9,86 cm/cm⁻³, B2 horizonte – nuo 5,44 iki 7,97 cm/cm⁻³, 2C (k) horizonte – nuo 6,70 iki 7,26 cm/cm⁻³ ir 2C horizonte nuo – 5,77 iki 5,99 cm/cm⁻³ (žr. 7 paveikslą).

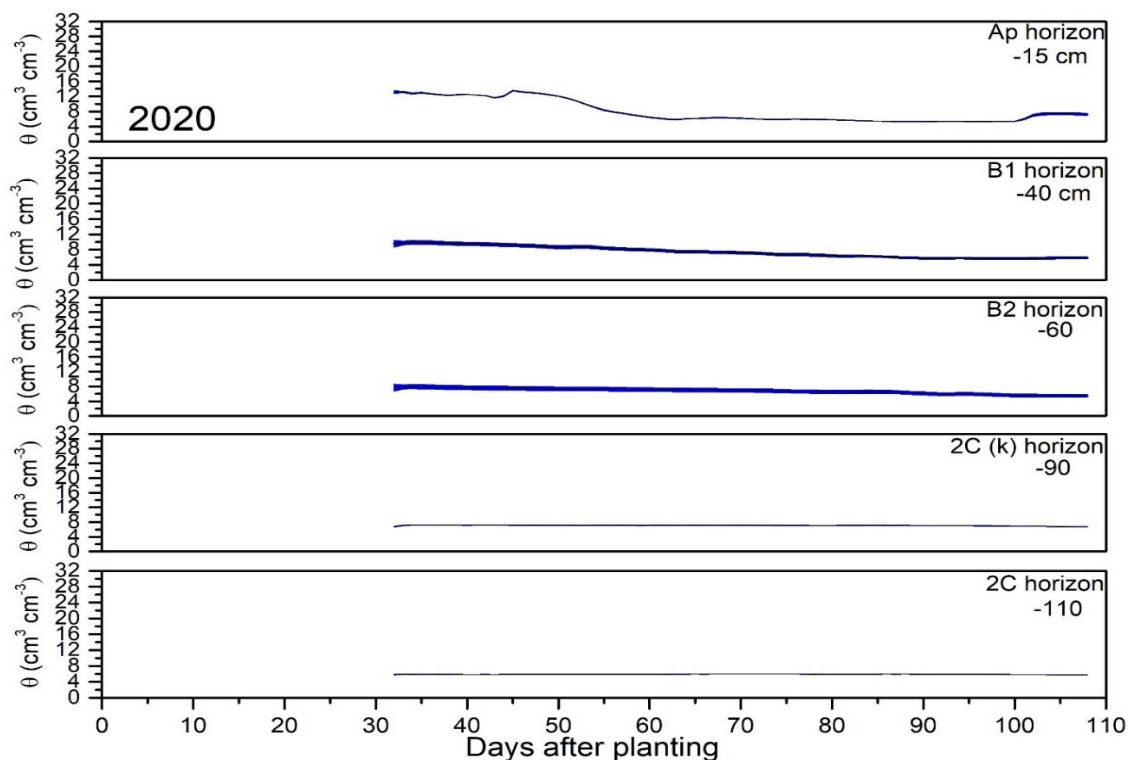
2021 m. vasarinių miežių vegetacijos metu dirvožemio drėgmė Ap horizonte vidutiniškai variavo nuo 13,25 iki 28,91 cm/cm⁻³, B1 horizonte – nuo 9,59 iki 14,61 cm/cm⁻³, B2 horizonte – nuo 7,56 iki 11,39 cm/cm⁻³, 2C (k) horizonte – nuo 9,94 iki 15,21 cm/cm⁻³ ir 2C horizonte – nuo 7,34 iki 10,18 cm/cm⁻³ (žr. 8 paveikslą).

2022 m. avižų vegetacijos metu, dirvožemio drėgmė Ap horizonte vidutiniškai variavo nuo 14,21 cm/cm⁻³ iki 28,76 cm/cm⁻³, B1 horizonte – nuo 10,58 cm/cm⁻³ iki 18,05 cm/cm⁻³, B2 horizonte – nuo 9,18 cm/cm⁻³ iki 13,58 cm/cm⁻³, 2C (k) horizonte – nuo 9,75 cm/cm⁻³ iki 13,92 cm/cm⁻³ ir 2C horizonte – nuo 5,89 cm/cm⁻³ iki 8,83 cm/cm⁻³ (žr. 9 paveikslą).

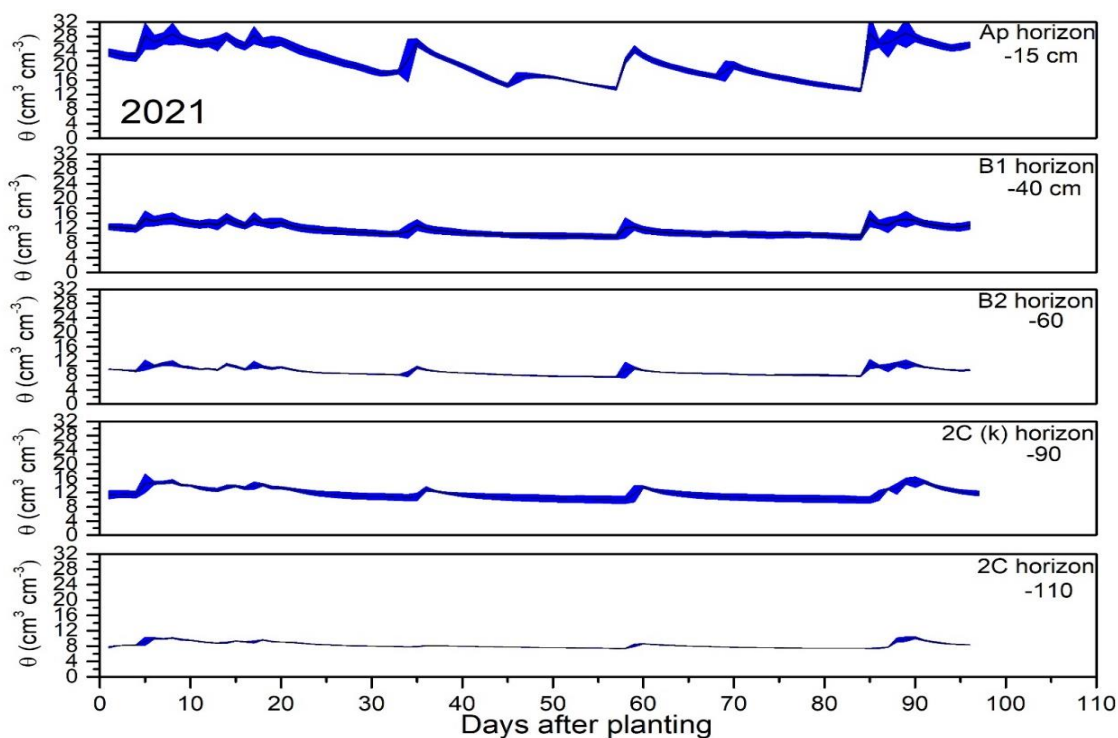
2023 m. žieminių rugių vegetacijos metu dirvožemio drėgmė viršutiniame Ap horizonte variavo nuo 15,8 cm/cm⁻³ iki 17,2 cm/cm⁻³, tik vegetacijos pabaigoje, po gausensio lietaus, drėgmės atsargos padidėjo (žr. 10 paveikslą). B1 horizonte (40 cm gylyje) drėgmė variavo tarp 12 ir 15 cm/cm⁻³. Gilesniuose horizontuose drėgmės atsargos buvo artimos ankstesnių metų rezultatams – tarp 5,8 ir 8 cm/cm⁻³.

Apibendrinimas. 2020 m. miežių vegetatyvinio periodo metu iškrito 225,4 mm kritulių, kai 2021 m. per miežių auginimo sezoną iškrito gerokai daugiau kritulių – 327,8 mm ir 2022 m. avižų vegetacinio periodo metu iškrito 346,2 mm kritulių – tai buvo didžiausias kritulių kiekis per visą eksperimento laikotarpį. 2023 m. per visą žieminių rugių augimo periodą kritulių iškrito 325,8 mm, iš kurių dalis iškrito žiemos metu. Minėti kritulių pasiskirstymo pokyčiai turėjo tiesioginės įtakos ir drėgmės variacijai, nors visais tyrimų metais drėgmės kiekis viršutiniame/ariamajame horizonte buvo pakankamas, tačiau žemesniuose horizontuose nuolat trūko drėgmės, tai ypač pastebėta 2020 m. Galima teigti, kad visais tyrimų metais vandens trūkumas esmingai mažino augalų produktyvumą (ypač 2020 m.) ir šiam sumažėjimui neabejotinai įtakos turėjo smėlingos dirvodarinės sudėties horizontai, kuriuose smėlis sudarė 81–95 % visos dirvožemio granulimetrinės sudėties (žr. 10 lentelę).

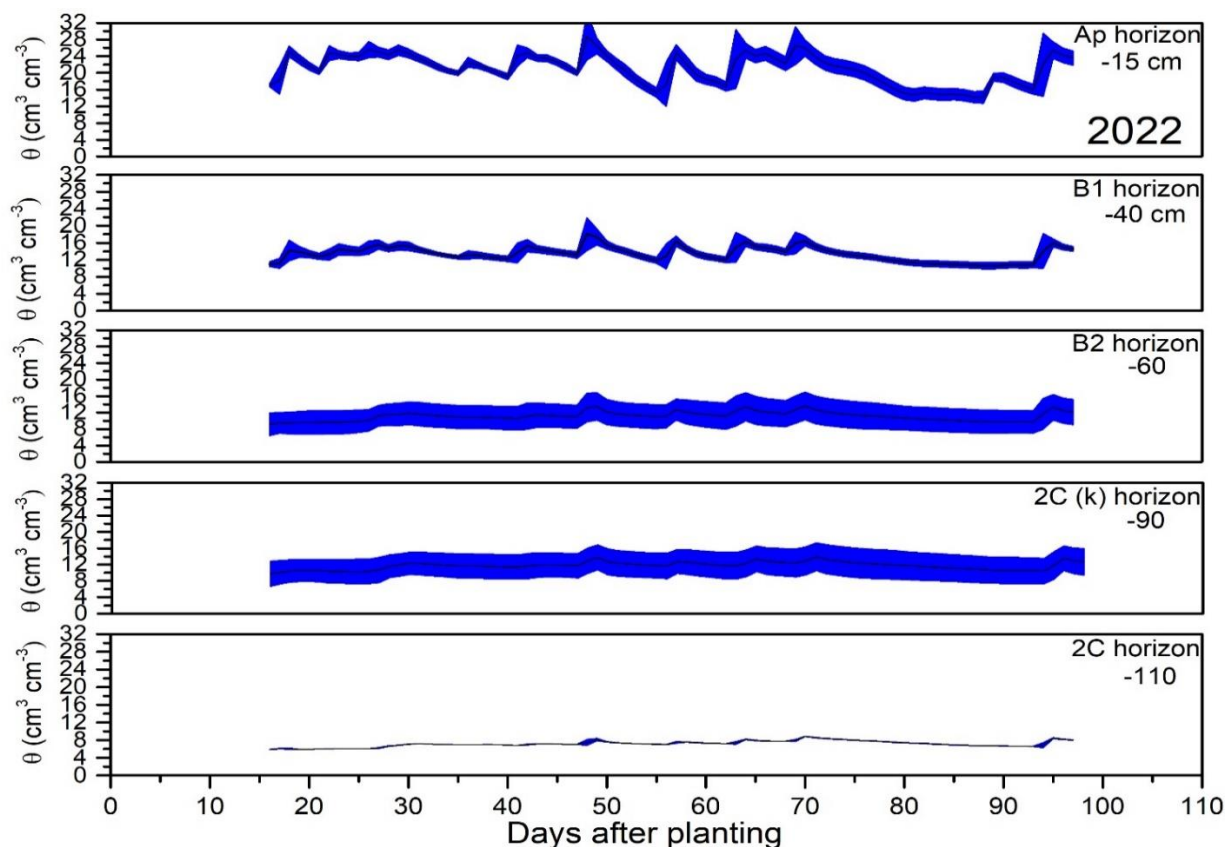
2020 m. vasarinių miežių vegetacijos metu dirvožemio temperatūros variacija buvo didesnė, lyginant su drėgmės pokyčiais. Temperatūra Ap horizonte vidutiniškai svyravo nuo 14,13 °C iki 22,97 °C, B1 horizonte – nuo 13,48 iki 20,49 °C, B2 horizonte – nuo 12,75 °C iki 18,85 °C, 2C (k) horizonte – nuo 11,64 °C iki 17,12 °C ir 2C horizonte – nuo 11,08 °C iki 16,62 °C (žr. 11 paveikslą).



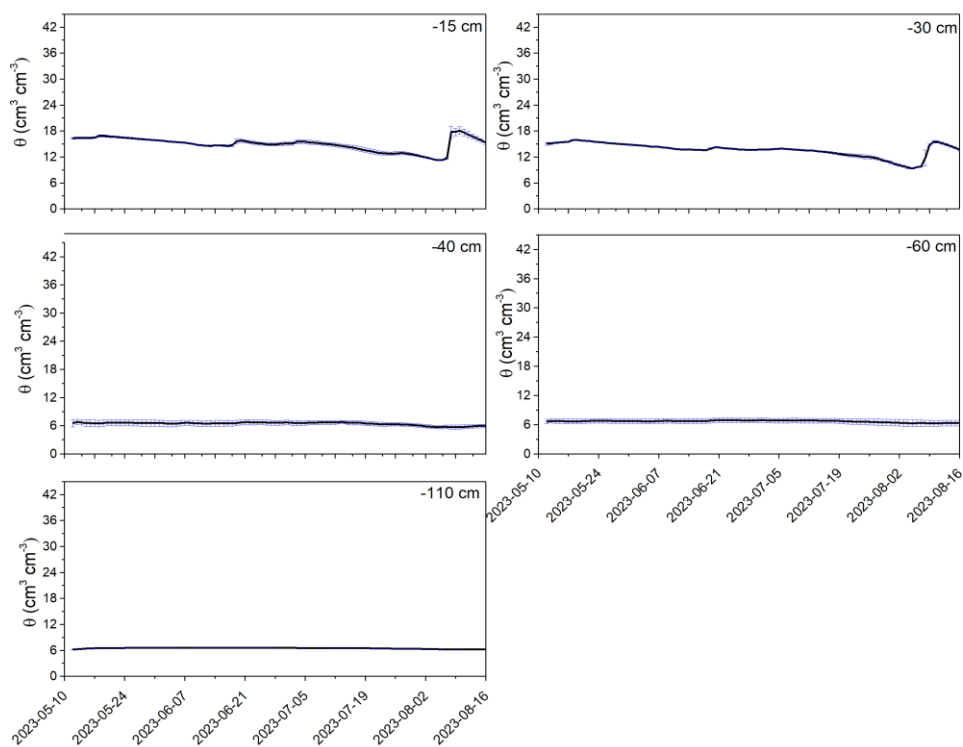
7 paveikslas. Dirvožemio drėgmės (θ) variacija 2020 metais skirtinguose jo genetiniuose horizontuose. Juoda linija parodo dienos vidurkį, mėlyna – standartinį nuokrypį.



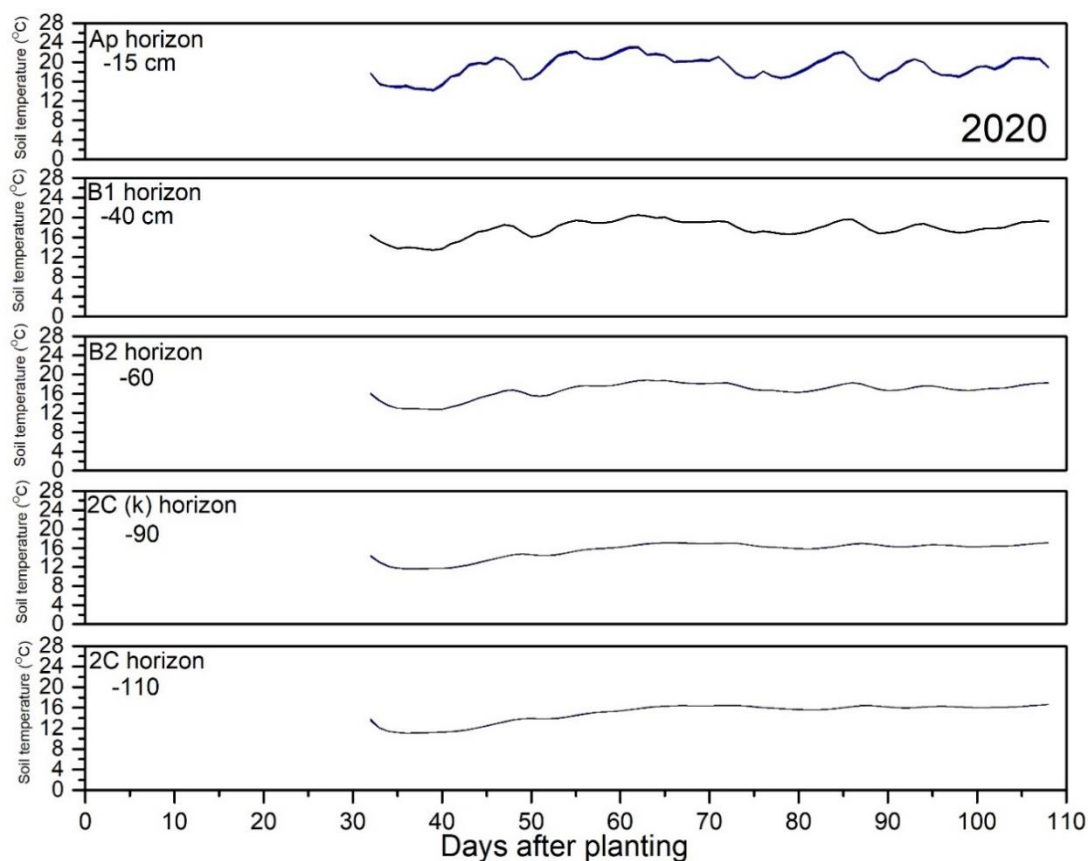
8 paveikslas. Dirvožemio drėgmės (θ) variacija 2021 metais skirtinguose jo genetiniuose horizontuose. Juoda linija parodo dienos vidurkį, mėlyna – standartinį nuokrypį.



9 paveikslas. Dirvožemio drėgmės (θ) variacija 2022 metais skirtinguose jo genetiniuose horizontuose. Juoda linija parodo dienos vidurkį, mėlyna – standartinę nuokrypį.

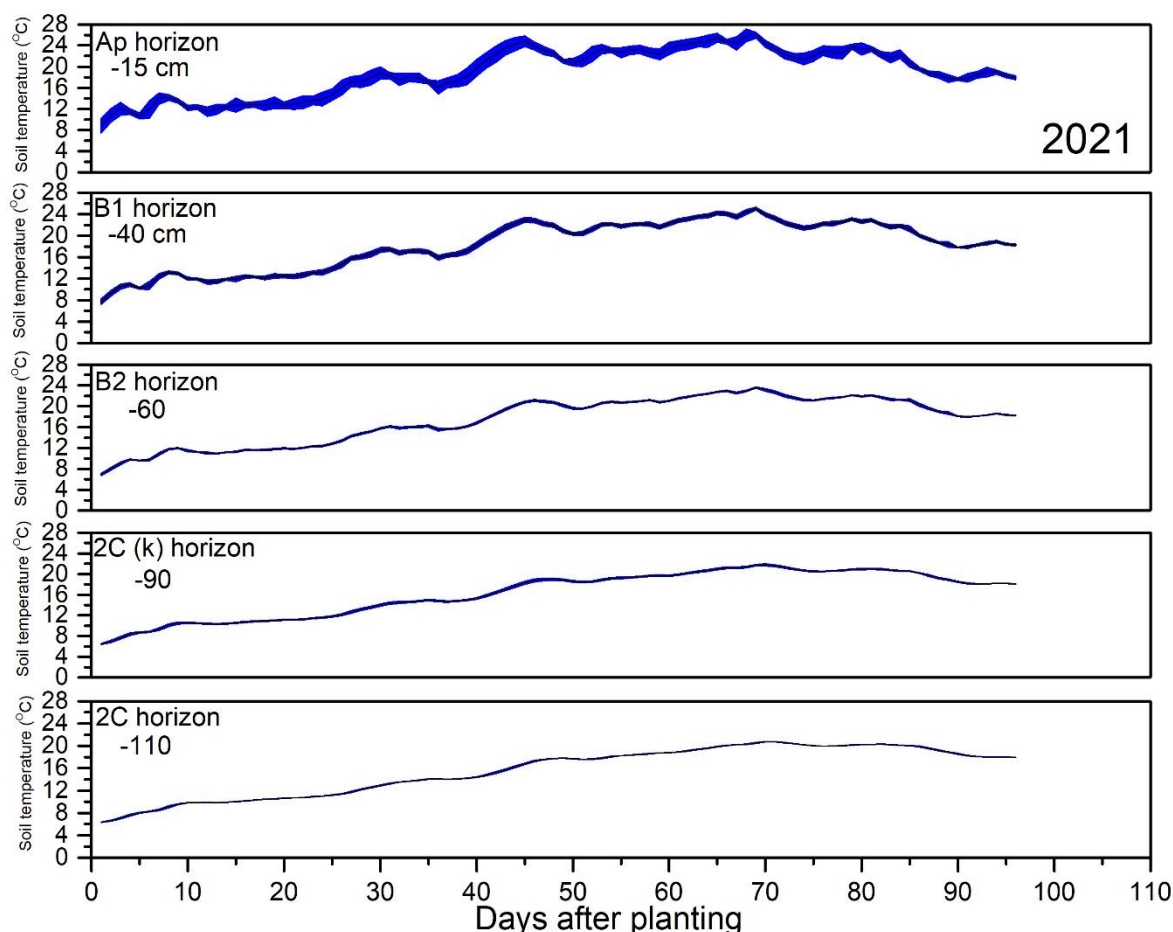


10 Paveikslas. Dirvožemio drėgmės (θ) variacija 2023 metais skirtinguose genetiniuose horizontuose.



11 paveikslas. Dirvožemio temperatūros variacija skirtinguose jo genetiniuose horizontuose 2020 metais

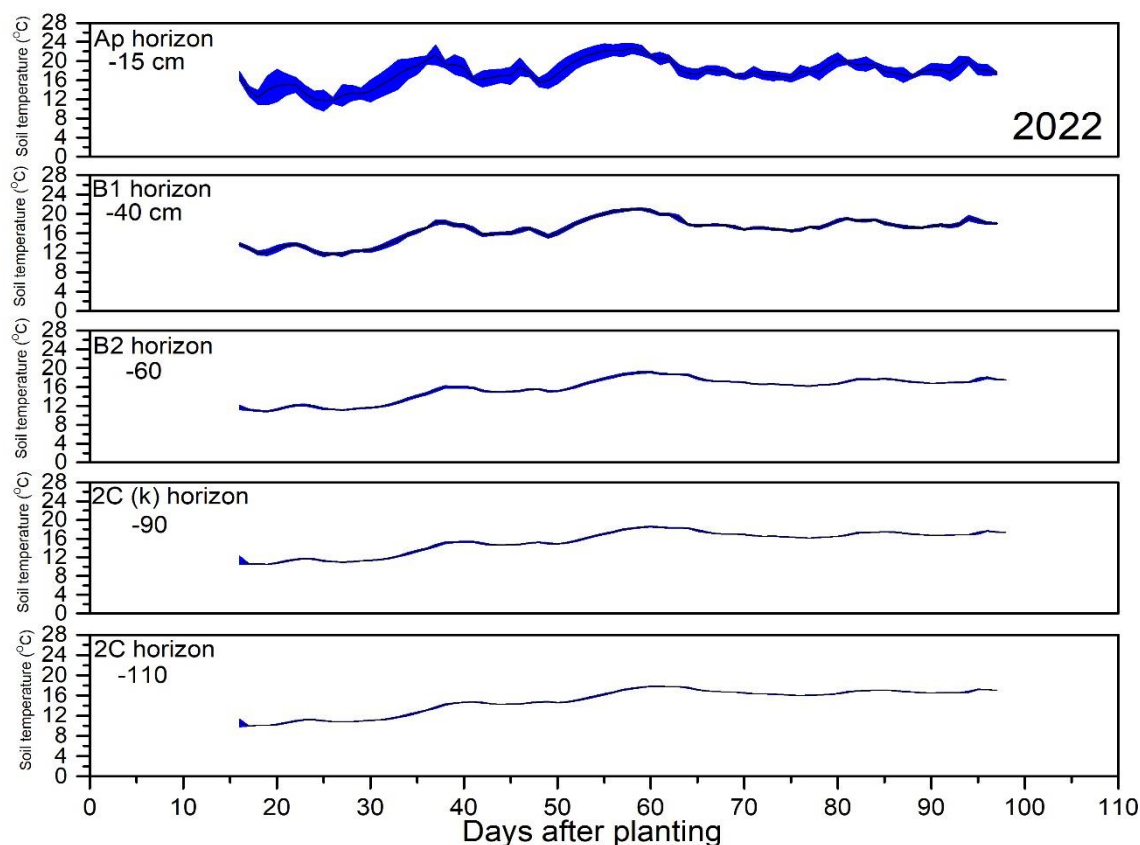
2021 m. vasarinių miežių vegetacijos metu dirvožemio temperatūros variacija buvo didesnė, lyginant su drėgmės pokyčiais. Temperatūra Ap horizonte vidutiniškai svyravo nuo 8,80 °C iki 25,92 °C, B1 horizonte – nuo 7,73 °C iki 25,03 °C, B2 horizonte – nuo 6,93 °C iki 23,59 °C, 2C (k) horizonte – nuo 6,48 °C iki 21,8 °C ir 2C horizonte – nuo 6,35 °C iki 20,75 °C (žr. 12 paveikslą).



12 paveikslas. Dirvožemio temperatūros variacija skirtinguose jo genetiniuose horizontuose 2021 metais.

2022 m. avių vegetacijos metu dirvožemio temperatūros variacija buvo didesnė lyginant su drėgmės pokyčiais. Temperatūra Ap horizonte vidutiniškai svyravo nuo 8,66 °C iki 24,52 °C, B1 horizonte – nuo 11,03 °C iki 21,34 °C, B2 horizonte – nuo 10,65 °C iki 19,42 °C, 2C (k) horizonte – nuo 10,42 °C iki 18,7 °C ir 2C horizonte – nuo 9,95 °C iki 17,91 °C (žr. 13 paveikslą).

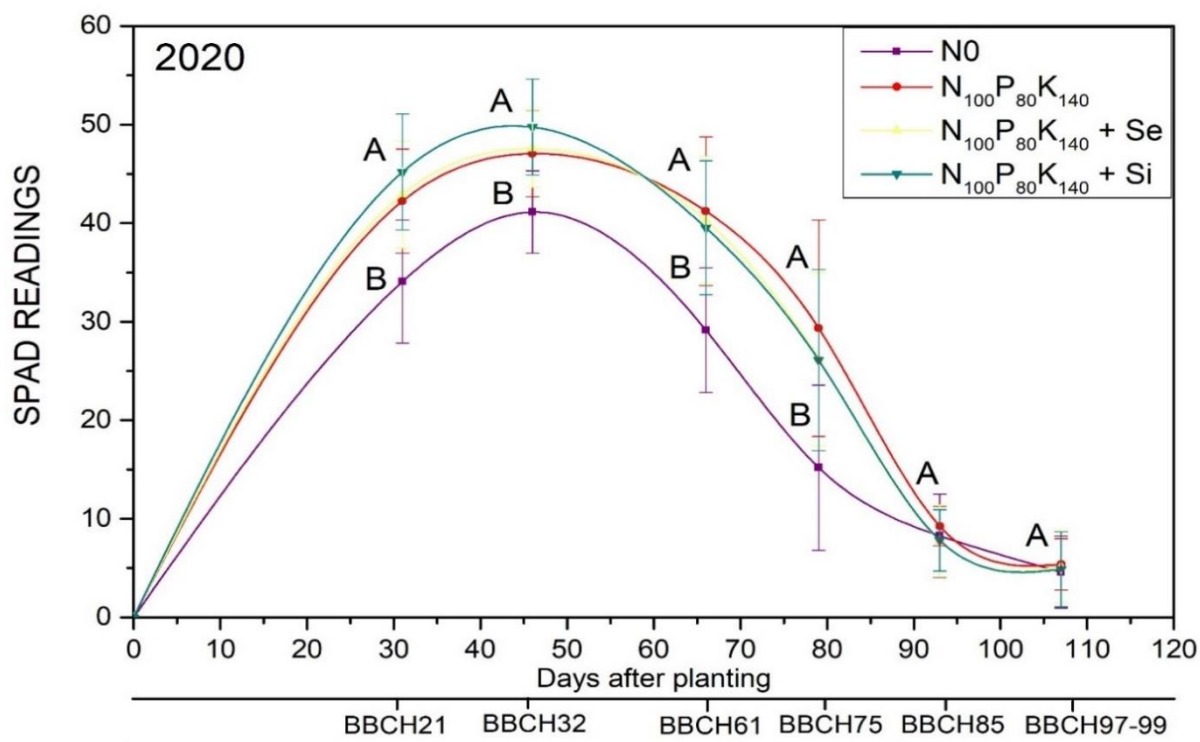
Apibendrinimas. 2020 m. miežių auginimo sezono metu vidutinė oro temperatūra buvo 15,93 °C, o 2021 m. per miežių vegetacinį periodą, temperatūra buvo net 2,64 °C aukštesnė (18,57 °C). 2022 m. per avių vegetacinį periodą, kuris yra labai panašus į miežių, vidutinė dirvožemio temperatūra siekė 17,89 °C. Oro temperatūros pokyčiai tiesiogiai įtakos turėjo ir dirvožemio temperatūros variacijai, pastebėta, kad aukščiausia dirvožemio temperatūra nustatyta viršutiniame Ap horizonte, taip pat temperatūros svyravimas šiame horizonte buvo didžiausias, žemesniuose horizontuose (B1–2C) dirvožemio temperatūra nuosekliai mažėjo.



13 paveikslas. Dirvožemio temperatūros variacija skirtinguose jo genetiniuose horizontuose 2022 metais.

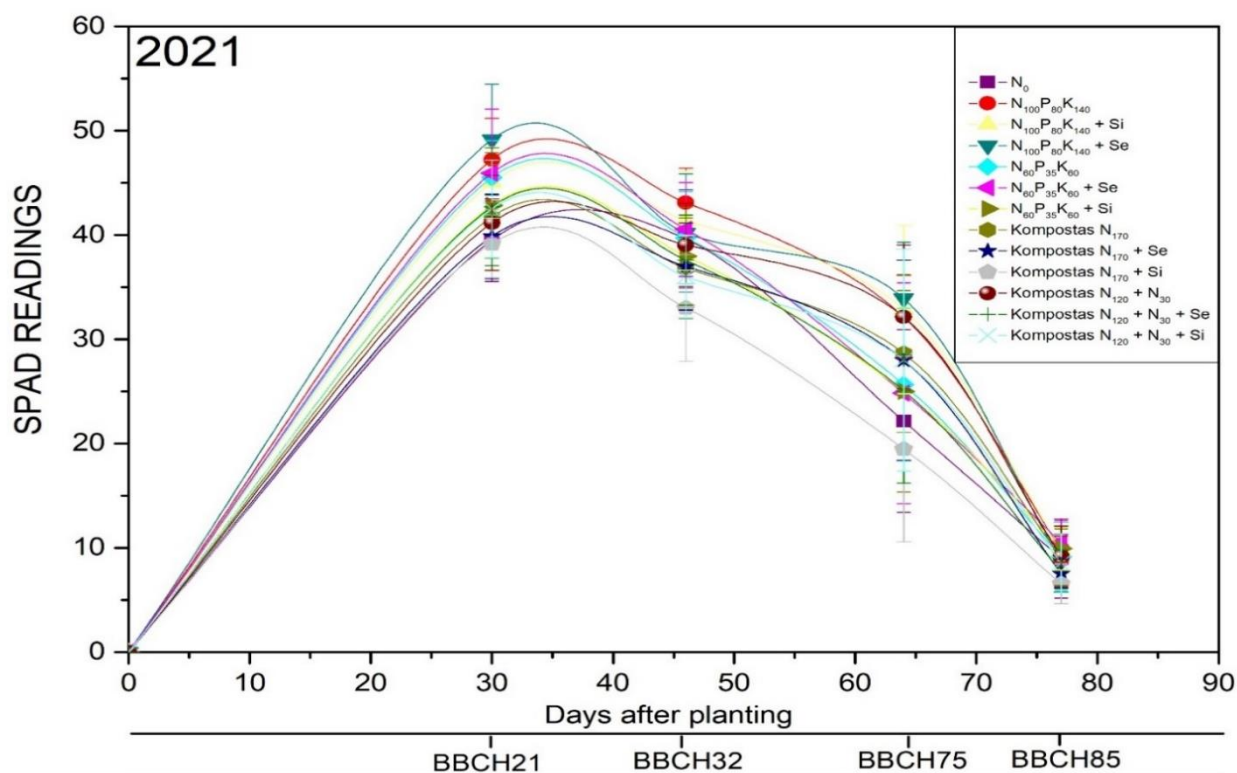
2.1.3. Chlorofilo indeksas (SPAD)

2020 m. vasarinių miežių vegetacijos metu chlorofilo indeksas (SPAD) didėjo iki bamblėjimo tarpsnio (BBCH32) ir tuo metu svyravo nuo 41,1 iki 49,8. Vėliau chlorofilo indekso reikšmės iki vegetacijos pabaigos pradėjo nuosekliai mažėti (žr. 14 paveikslą). Atlikta statistinė analizė parodė, kad tręštuose variantuose (NPK, NPK + Se ir NPK + Si) chlorofilo indekso reikšmės buvo esmingai didesnės negu kontroliniame – netręštame variante.



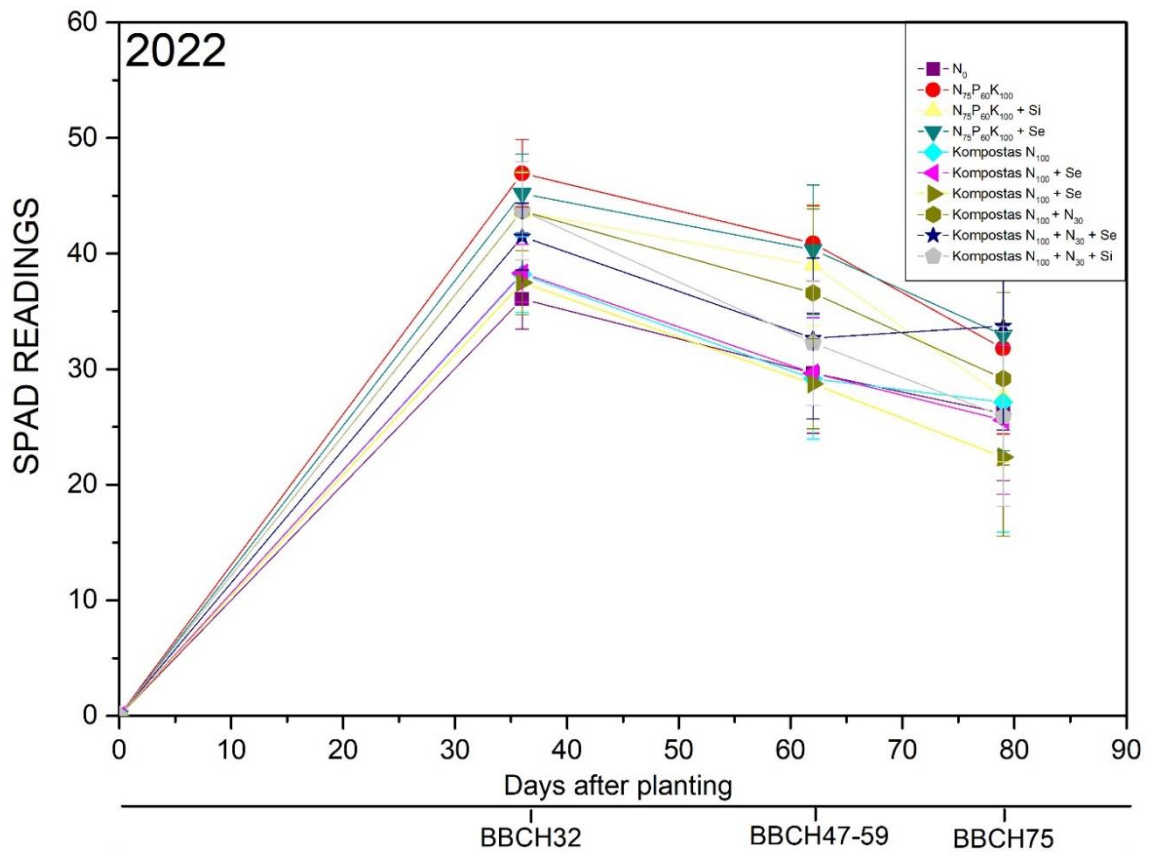
14 paveikslas. Chlorofilo indekso (SPAD) variacija miežių auginimo sezono metu. Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).

2021 m. miežių vegetacijos metu didžiausios chlorofilo indekso (SPAD) reikšmės buvo nustatytos ankstyvuose augalų vystymosi tarpsniuose (BBCH 21), kurios svyravo nuo $39,2 \pm 3,2$ iki $49,1 \pm 5,3$. Vėliau chlorofilo indekso reikšmės iki vegetacijos pabaigos pradėjo nuosekliai mažėti (žr. 15 paveikslą). Gautų rezultatų analizė parodė, kad variantuose, kurie tręšti didžiausia mineralinių trąšų norma, aukštesnis chlorofilo indeksas išsilaikė ilgiau nei variantuose, kuomet naudotas vien tik kompostas ar komposto ir mineralinių trąšų deriniai.



15 paveikslas. Chlorofilo indekso (SPAD) variacija miežių pasėlyje 2021 metais.

2022 m. avižų vegetacijos metu, didžiausios chlorofilo indekso (SPAD) reikšmės buvo nustatytos BBCH32 tarpsnio metu, tuo metu SPAD reikšmės svyravo nuo $36,1 \pm 2,6$ iki $46,9 \pm 2,9$. Vėlesniais matavimais chlorofilo indekso reikšmės pradėjo nuosekliai mažėti (žr. 16 paveikslą). Plaukėjimo tarpsnio metu (BBCH47-59), t. y. prieš pat žydėjimą, SPAD reikšmės svyravo nuo $29,7 \pm 5,2$ iki $40,9 \pm 3,3$, o grūdų vystymosi metu (BBCH75) SPAD reikšmės svyravo tik $\approx 22-34$ ribose. Gautų rezultatų statistinė analizė parodė, kad variantuose, kuriuose naudotos tik mineralinės trąšos ($N_{75}P_{60}K_{100}$), chlorofilo indeksas buvo aukštesnis nei variantuose, kur naudotas vien tik kompostas (N_{100}), ar net tuose variantuose, kur kompostas derintas su mineralinėmis trąšomis ($N_{100} + N_{30}$).

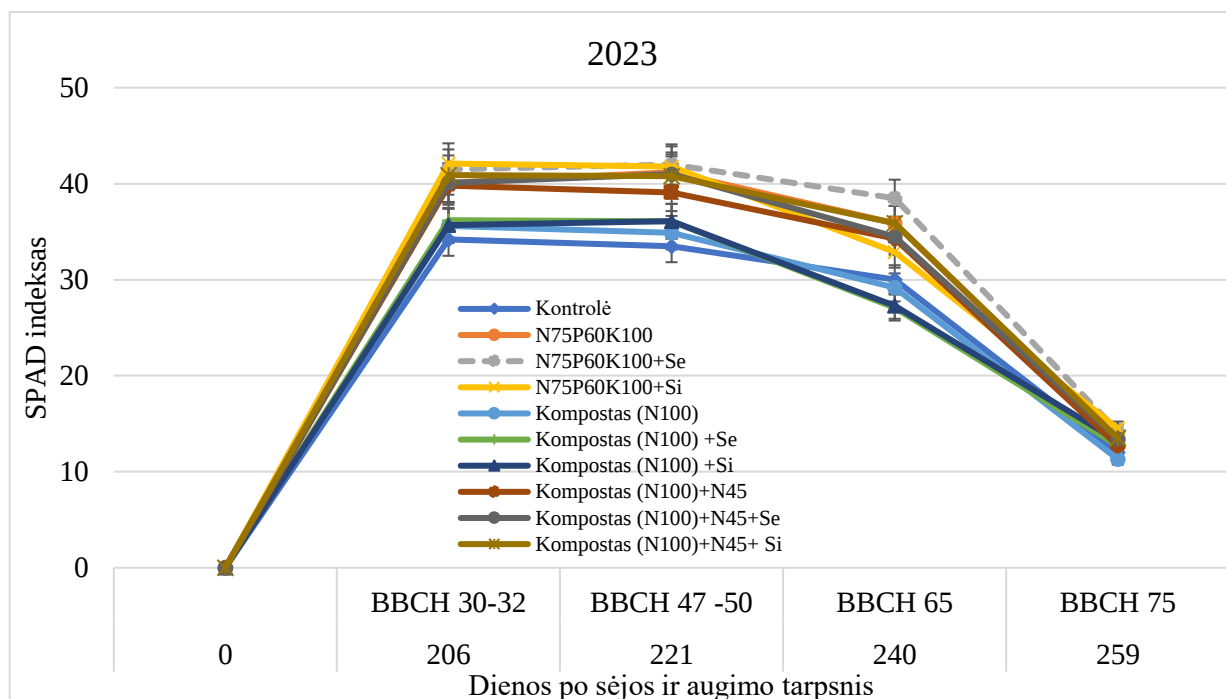


16 paveikslas. Chlorofilo indekso (SPAD) variacija 2022 m. avių pasėlyje skirtingais auginimo tarpsniais.

Rugių vegetacijos metu chlorofilo indeksas matuotas 4 kartus: augalams esant BBCH 30-32, BBCH 47-50, BBCH 65 ir BBCH 75 augimo tarpsnyje (žr. 17 paveikslą). Pirmojo matavimo metu, žieminių rugių augalams esant stiebo ilgėjimo tarpsnyje, chlorofilo indeksas buvo didžiausias variantuose, kuriuose tręšimui naudotos mineralinės trąšos arba komposto ir mineralinių trąšų derinys. Mažesnės chlorofilo indekso vertės nustatytos kontroliniame (netręštame) variante ir tuose, kuriuose naudotos tik komposto granulės. Vegetacijos metu, augalui senėjant vegetatyvinėje dalyje (lapuose) chlorofilo indeksas mažėjo. 2023 m. gegužės ir birželio mėn. vyravusi sausra taip pat spartino augalų brandos procesą, ir tai lėmė chlorofilo indekso mažėjimą žieminių rugių lapuose. Žieminiai rugiai pasižymi tuo, kad dalį fotosintezės gali vykdyti žalias augalo stiebas, tačiau, esant sausringam periodui drėgmės stygius tampa pagrindiniu veiksniu, limituojančiu gyvybinius augalo procesus ir tai atsiliepia augalų produktyvumui.

Apibendrinimas. Chlorofilo indekso vertinimas parodė, kad naudotos priemonės – mineralinės trąšos ir komposto granulės, skirtingų augalų pasėliuose turėjo panašias poveikio tendencijas. Chlorofilo indeksas koreliuoja su augalo apsirūpinimu azotu, tad visais tyrimų metais didesnis chlorofilo indeksas nustatytas variantuose, kuriuose panaudotos mineralinės trąšos arba komposto ir mineralinių trąšų

derinys. Mažesnės chlorofilo indekso vertės nustatytos variantuose, kuriuose naudotos vien tik komposto granulės. Mažiausia chlorofilo indekso vertė visais tyrimų metais nustatyta kontroliniame (netręštame) variante.



17 paveikslas. Chlorofilo indekso (SPAD) variacija 2023 m. skirtingais auginimo tarpsniais žieminių rugių pasėlyje.

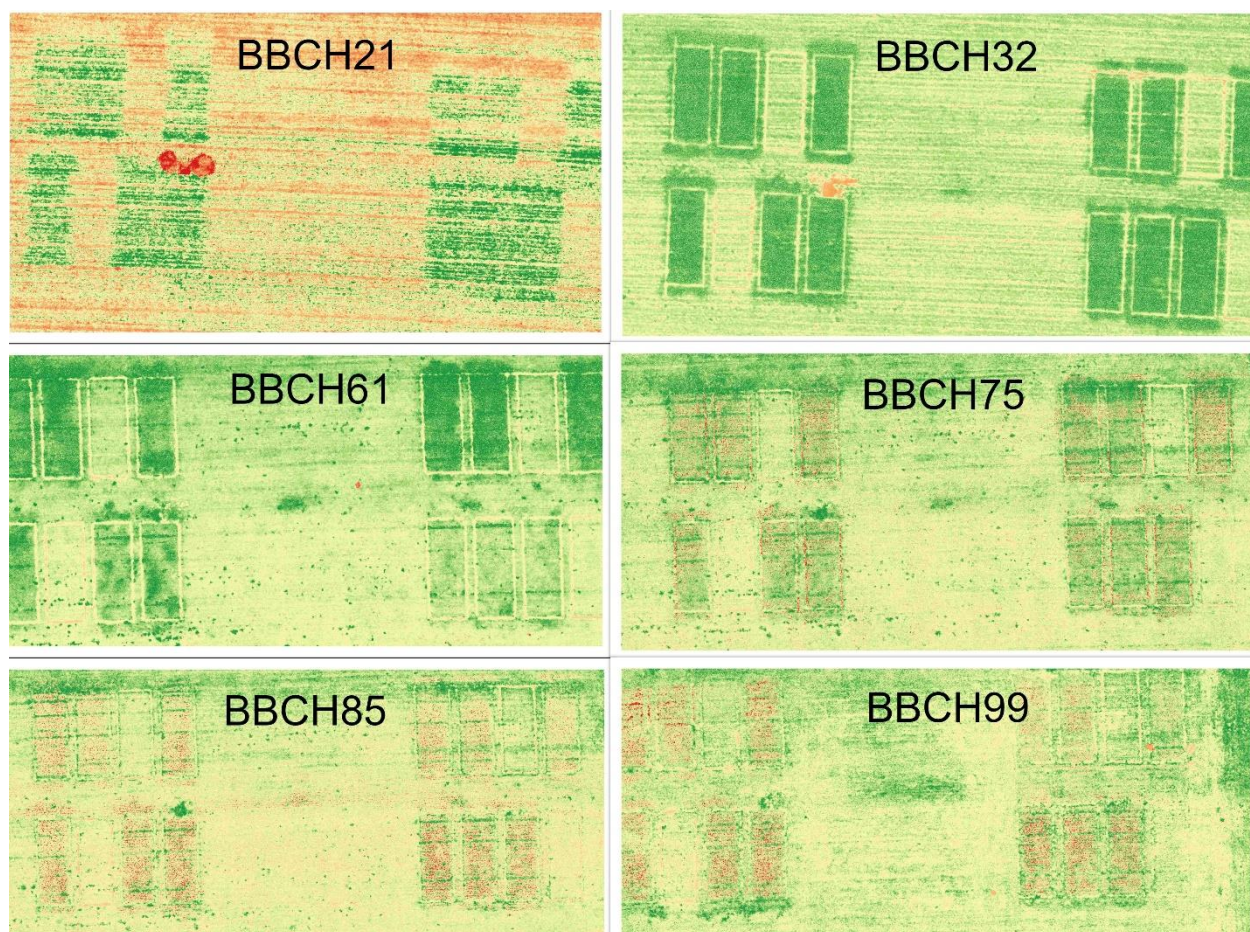
2.1.4. Bepilotės skraidyklės derliaus prognozavimui

2020 m. miežių vegetacijos metu apskaičiuoti 4 skirtingi vasarinių miežių augalų vegetatyviniai indeksai (žr. 18 paveikslą), kurie lyginti su grūdų derliumi. Atlikta koreliacinė-regresinė analizė parodė, kad stipriausia priklausomybė tarp grūdų derliaus ir vegetatyvinių indeksų gauta intensyvaus stiebo augimo metu (BBCH32), tuo metu R^2 siekė $\approx 0,91$. Vėlyvesniais augimo tarpsniais R^2 reikšmės nuosekliai mažėjo, t. y. nuo $R^2 = 0,59$ (BBCH61) iki $R^2 = 0,14$ (BBCH99).

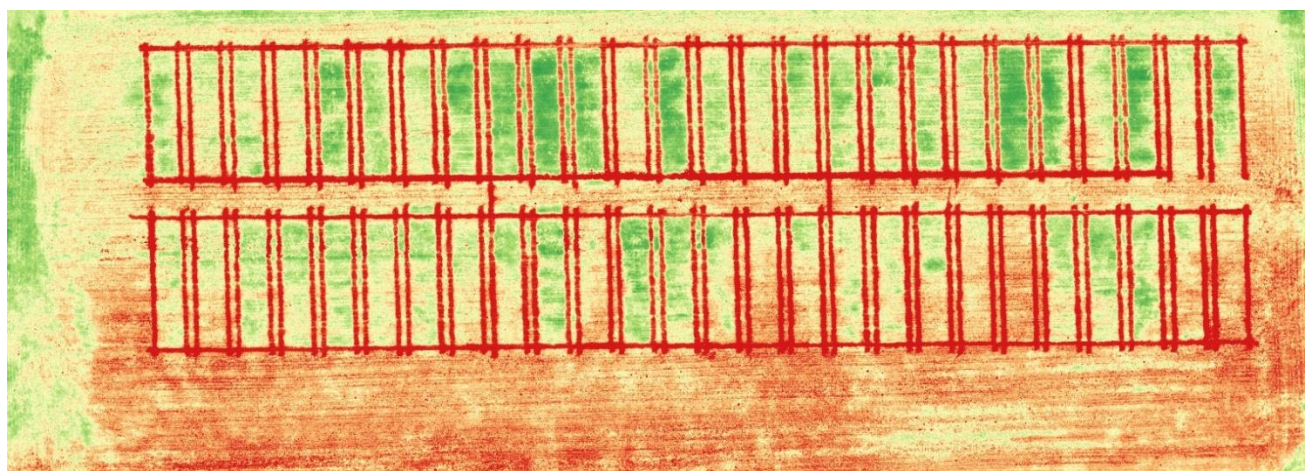
2021 m. miežių vegetacijos metu apskaičiuota 20 skirtingų RGB ir 5 multispektriniai augalų vegetatyviniai indeksai (žr. 19 paveikslą), kurie lyginti su grūdų derliumi. Atlikta koreliacinė-regresinė analizė parodė, kad stipriausia priklausomybė tarp grūdų derliaus ir vegetatyvinių indeksų gauta intensyvaus stiebo augimo metu (BBCH32), tuo metu R^2 svyravo nuo 0,4–0,7. Vėlyvesniais augimo tarpsniais R^2 reikšmės nuosekliai mažėjo.

2022 m. avių vegetacijos metu apskaičiuota 20 skirtingų RGB ir 5 multispektriniai augalų vegetatyviniai indeksai, t. y. tokie pat, kaip ir 2021 m. (žr. 20 paveikslą). Šie minėti indeksai lyginti su avių grūdų derliumi. Visais atvejais apskaičiuotų indeksų reikšmės buvo aukštesnės variantuose, kuriuose panaudotos mineralinės trąšos, kai mažiausios reikšmės nustatytos kontroliniame variante. Atlikta koreliacinė-regresinė analizė parodė labai panašius rezultatus kaip ir 2021 m., t. y. stipriausia

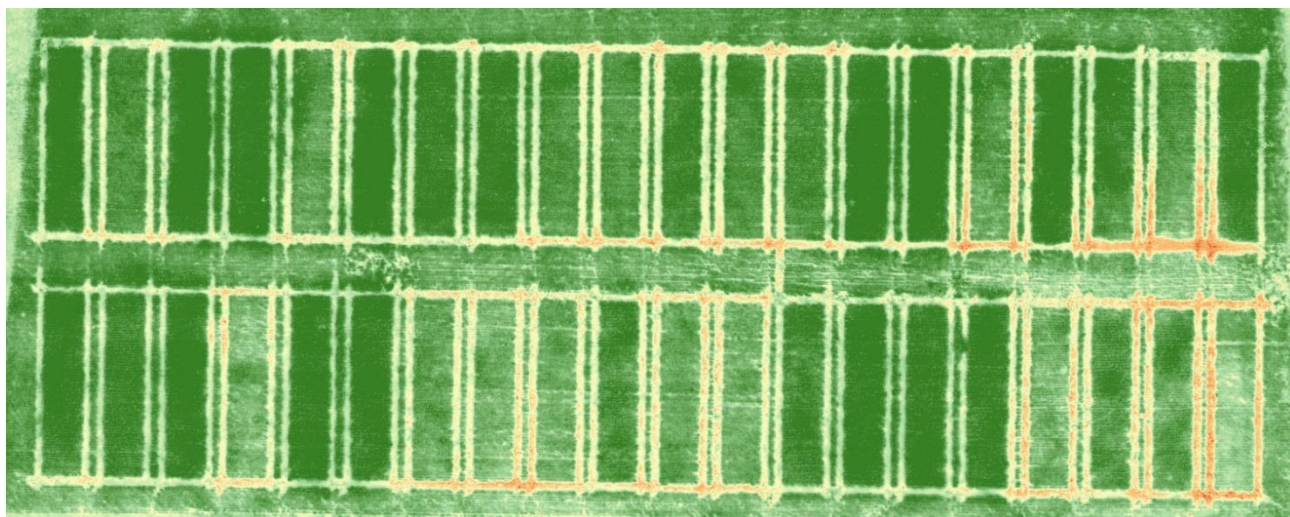
priklausomybė tarp grūdų derliaus ir vegetatyvinių indeksų gauta birželio–liepos mėnesiais (krūmijimosi, bamblėjimo metu), tuo metu R^2 svyravo 0,4–0,6, vėlyvesniais laikotarpiais R^2 reikšmės mažėjo.



18 paveikslas. Apskaičiuotas GLI (angl. *Green Leaf Index*) vegetatyvinis indeksas miežių vegetacijos metu.



19 paveikslas. Apskaičiuotas NDVI (angl. *Normalized Difference Vegetation Index*) vegetatyvinis indeksas miežių vegetacijos metu.



20 paveikslas. Apskaičiuotas NDVI (*angl. Normalized difference vegetation index*) vegetatyvinis indeksas avių vegetacijos metu.

2.1.5. Biomasės ir grūdų derlius

2020 m. miežių vegetacijos laikotarpiu (balandžio 27 – rugpjūčio 12 dienomis) vidutinė oro temperatūra buvo artima standartinei klimato (SKN) normai ir siekė 15,9 °C (1991–2020 m. SKN – 15,70 °C) (žr. 12 lentelę). Iškritusių kritulių kiekis taip pat buvo artimas SKN ir siekė 225,4 mm (1991–2020 m. SKN – 249,0 mm). Apibendrinant 2020 m. meteorologines sąlygas, galima teigti, kad jos miežių augimo metu, pagal temperatūrinius ir kritulių pokyčius, buvo vidutinės.

Šiek tiek kitokia situacija buvo 2021 m. Miežių auginimo sezono metu, t. y. nuo gegužės 10 – rugpjūčio 13 d., vidutinė oro temperatūra siekė 18,57 °C, t. y. 1,85 °C daugiau negu SKN, kuri tokių pat periodu siekė 16,72 °C. Iškritusių kritulių kiekis siekė 327,8 mm, tai buvo net 105,8 mm daugiau, nei vidutinė daugiametė norma 1991–2020 m. Visgi svarbu paminėti, kad auginimo sezonu kritulių kiekis pasiskirstė netolygiai, nes per 9 dienas, kai fiksuotas lietus, iškritusių kritulių kiekis kaskart viršijo 10 mm, bendras kritulių kiekis per šias 9 dienas sudarė 216,9 mm, t. y. $\approx 66\%$ sezono kritulių iškrito per 9 dienas. Apibendrinant 2021 m. meteorologines sąlygas, galima teigti, kad auginimo sezonas buvo šiltas ir vėsus.

2022 m. avių sudygimui užteko ir šilumos ir drėgmės. Krūmijimosi tarpsnyje buvo gausu kritulių ir temperatūros buvo palankios produktyvumo elementų formavimui. Tačiau stiebo ilgėjimo tarpsnyje aukštesnės temperatūros skatino augalus greičiau vystytis, ir tai nėra labai palankus procesas augalų produktyvumo potencialo realizavimui. Žydėjimo tarpsnio metu pakankamas kritulių kiekis užtikrino drėgmės atsargas, tačiau buvo karščio bangų, kai temperatūra pakilo daugiau kaip +30 °C, ir tai galėjo neigiamai veikti žiedadulkes, dėl ko javai galėjo suformuoti mažiau grūdų. Visgi, apibendrinant 2022 m., galima teigti, kad jie buvo palankūs avių auginimui.

Žieminiai rugiai pasėti 2023 m. spalio pirmąją dekadą, po sėjos kritulių iškrito mažiau nei 10 mm, tačiau to užteko, kad rugiai pradėtų dygti. Rudeninė rugių vegetacija tęsėsi iki lapkričio antrosios

dekados, kai vidutinė paros temperatūra nukrito žemiau 5 °C ribos. Žiemos periodas nebuvo itin šaltas, tai leido žieminiams rugiams gerai peržiemoti. Pavasarinės vegetacijos metu krituliai nebuvo gausūs. Itin nepalankus periodas meteorologinių sąlygų atžvilgiu buvo stiebo ilgėjimo – žydėjimo tarpsniais, kai stigo drėgmės. Drėgmės stigo ir grūdo formavimo ir pildymo tarpsniuose, be to šiame etape pasitaikė ir karščio bangų. Apibendrinat žieminių rugių vegetacijos periodą galima apibūdinti kaip sausringą svarbiais augalų produktyvumo potencialo realizavimo tarpsniais.

12 lentelė. Fiksuotos meteorologinės sąlygos skirtingais vasarinių miežių (2020 m. ir 2021 m.), avižų (2022 m.) ir žieminių rugių augimo ir vystymosi tarpsniais 2020–2023 metais.

Metai	Data	Dienos po sėjos	Augimo tarpsnis	Oro Temperatūra (C°)			Dirvožemio temperatūra (C°) 15 cm gylyje	Krituliai (mm)
				vidutinė	aukščiausia	žemiausia	vidutinė	
2020	2020 04 27 – 2020 05 07	0–10	Sėja –Sudygimas (BBCH09)	9,94	15,53	5,1	–	22,8
	2020 05 08 – 2020 06 07	11–41	Lapų vystymasis (BBCH10) –Krūmijimosi pabaiga (BBCH29)	11,28	16,82	6,1	–	68,8
	2020 06 08 –2020 07 01	42–65	Stiebo ilgėjimo pradžia (BBCH30) – Plaukėjimo pabaiga (BBCH59)	20,77	26,21	15,85	20,47	54,9
	2020 07 02 – 2020 07 12	66–76	Žydėjimo pradžia ir pabaiga (BBCH61-BBCH69)	17,31	22,3	13,1	18,89	22
	2020 07 13 – 2020 08 12	77–107	Grūdų vystymasis (BBCH70) –Pilna branda (BBCH93-99)	18,46	24,21	12,63	18,96	56,9
				15,93	21,45	10,75	–	225,4
2021	2021 05 10 – 2021 05 17	0–7	Sėja –Sudygimas (BBCH09)	14,64	20,54	9,78	11,73	39,4
	2021 05 18 – 2021 06 20	8–41	Lapų vystymasis (BBCH10) –Krūmijimosi pabaiga (BBCH29)	15,53	21,2	10,09	15,49	91,2
	2021 06 21 – 2021 07 06	42–57	Stiebo ilgėjimo pradžia (BBCH30) – Plaukėjimo pabaiga (BBCH59)	22,22	27,5	17,68	22,84	105,6
	2021 07 07 – 2021 07 12	58–63	Žydėjimo pradžia ir pabaiga (BBCH61-BBCH69)	24,58	30,27	18,43	23,9	0
	2021 07 13 – 2021 08 13	64–96	Grūdų vystymasis (BBCH70) –Pilna branda (BBCH93-99)	19,84	25,51	14,92	21,55	91,6
				18,57	24,20	13,46	18,95	327,8
2022	2022 05 04 - 2022 05 12	0 - 9	Sėja –Sudygimas (BBCH09)	10,14	15,68	4,86		23,6
	2022 05 13 - 2022 06 07	10 - 35	Lapų vystymasis (BBCH10) –Krūmijimosi pabaiga (BBCH29)	13,57	18,95	8,88		101,8
	2022 06 08 - 2022 07 05	36 - 63	Stiebo ilgėjimo pradžia (BBCH30) – Plaukėjimo pabaiga (BBCH59)	20,56	26,29	15,18	19,3	54,6
	2022 07 06 - 2022 07 16	64 - 74	Žydėjimo pradžia ir pabaiga (BBCH61-BBCH69)	24,45	30,25	18,72	17,47	80,5
	2022 07 17 - 2022 08 09	75 - 96	Grūdų vystymasis (BBCH70) –Pilna branda (BBCH93-99)	19,37	24,97	14,48	18,22	85,7
				17,89	23,49	12,79		346,2
2023	2022 10 10 -2022 10 18	0-9	Sėja - sudygimas (BBCH 09)	10,3	15,7	0,5	10,2	9,5
	2022 10- 19 – 2023 05 08	10 – 210	Lapų vystymasis (BBCH10) –Krūmijimasis (BBCH 29)	-	-	-17,5	-	211,8
	2023 05 09 - 2023 05 29	211- 231	Stiebo ilgėjimo pradžia (BBCH30) – Plaukėjimo pabaiga (BBCH59)	14,8	26,8	0,3	15,8	9,6
	2023 05 30 - 2023 06 15	232 – 247	Žydėjimo pradžia ir pabaiga (BBCH61-BBCH69)	15,5	29,2	2,4	19,7	4,4
	2023 06 16 - 2023 08 16	248 - 310	Grūdų vystymasis (BBCH70) –Pilna branda (BBCH93-99)	18,68	33,4	8,0	21,2	90,5
								325,8

2020 m rugpjūčio mėnesį, kai miežiai pasiekė fiziologinę brandą, gautas biomasės derlingumas svyravo nuo 1,98 t ha⁻¹ iki 4,38 t ha⁻¹, grūdų derlingumas svyravo nuo 0,93 t ha⁻¹ iki 2,12 t ha⁻¹ (žr. 13 lentelę). Statistinė rezultatų analizė parodė esminius variantų skirtumus ($p < 0,01$), t. y. kontroliniame variante gautas derlius buvo esmingai mažesnis negu likusiuose eksperimento variantuose. Gautas grūdų derlingumas, palyginti su Lietuvos vidutiniu vasarinių miežių derlingumu, buvo ≈ 40 % mažesnis (Eurostat, 2020).

13 lentelė. Vasarinių miežių biomasės derlius (sausų medžiagų) 2020 metais.

Variantai	Sausųjų medžiagų kiekis t ha ⁻¹				
	Antžeminės biomasės dalies	Grūdų derlius	Stiebai	Lapai	Pelai
1 Kontrolė	1,98 B	0,93 B	0,45 B	0,44 B	0,16 B
2 NPK	4,15 A	2,10 A	0,91 A	0,86 A	0,28 A
3 NPK + Se	4,38 A	2,21 A	0,98 A	0,91 A	0,27 A
4 NPK + Si	4,34 A	2,12 A	0,96 A	0,99 A	0,26 A

Pastaba. Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).

2021 m. gausūs krituliai pradinuose vasarinių miežių augimo etapuose buvo palankūs produktyvumo potencialo realizavimui, tačiau birželio ir liepos mėnesiais vyravę sausringi ir su aukštomis temperatūromis orai skatino greitesnį augalų vystymąsi, tai neigiamai atsiliepė derlingumui (žr. 14 lentelę). Vertinant taikytų skirtingų tręšimo technologijų efektyvumą, didesni biomasės kiekiai užauginti variantuose, kuriuose panaudotos mineralinės trąšos arba komposto granulės su mineralinėmis trąšomis. Naudojant vien tik komposto granules, vasarinių miežių produktyvumas buvo ne esmingai mažesnis lyginant su kitais variantais. Tokį rezultatą galėjo lemti tai, kad iš komposto granulės maisto medžiagos atsipalaiduoja palaipsniui, ir dažniausiai skaičiuojama, kad pirmaisiais metais iš organinių trąšų augalai paima apie ketvirtadalį maisto medžiagų. Tikėtina, kad tai buvo pagrindinė limituojanti produktyvumą priežastis.

Papildomas tręšimas silicio trąšomis skatino didesnę biomasės derlingumą lyginant su ta pačia tręšimo technologija, kurioje nenaudotos silicio trąšos. Silicis ir jo turintys tręšimo produktai, apibūdinami kaip galintys sušvelninti nepalankių augimo sąlygų poveikį augalų produktyvumui. Tačiau grūdų derlingumo rezultatai parodė, kad ir papildomas tręšimas seleno gali turėti grūdų derlingumo didinimo tendencijų. Tikėtina, kad drėgmės stoka ir aukštos temperatūros kritiniais vasarinių miežių augimo tarpsniais tampa limituojančiais veiksniais, kurie riboja produktyvumo potencialo realizavimą.

14 lentelė. Vasarinių miežių biomasės derlius (s.m.) 2021 metais.

Variantai	Sausųjų medžiagų kiekis t ha ⁻¹				
	Antžeminės dalies biomasės	Grūdų derlius	Stiebai	Lapai	Pelai
1 Kontrolė	2,49 B	0,88 B	0,89 A	0,59 A	0,14 A
2 N100P80K140	4,66 A	1,91 A	1,65A	0,83A	0,27 A
3 N100P80K140 + Se	4,75 A	1,85A	1,64 A	0,98 A	0,28 A
4 N100P80K140 + Si	4,97 A	1,95 A	1,72 A	1,03A	0,27 A
5 N60P35K60	3,25 BA	1,23 BA	1,14 A	0,68A	0,19 A
6 N60P35K60 + Se	3,57 BA	1,41 BA	1,23 A	0,73A	0,20 A
7 N60P35K60 + Si	3,77 BA	1,29 BA	1,43 A	0,85 A	0,20 A
8 Komposto granulės (N170)	2,68 BA	1,04 BA	0,91 A	0,54 A	0,18 A
9 Komposto granulės (N170) + Se	3,30 BA	1,23 BA	1,25 A	0,63 A	0,19 A
10 Komposto granulės (N170) + Si	2,60 BA	1,05 BA	0,88 A	0,52 A	0,16 A
11 Komposto granulės (N120) + 30 kg N mineralinių trąšų	3,45 BA	1,49 BA	1,10 A	0,66 A	0,20 A
12 Komposto granulės (N120) + 30 kg N mineralinių trąšų + Se	3,26 BA	1,29 BA	1,10 A	0,66 A	0,21 A
13 Komposto granulės (N120) + 30 kg N mineralinių trąšų + Si	3,88 BA	1,57 BA	1,28 A	0,76 A	0,27 A

Pastaba. Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).

2022 metai augintų avižų grūdų derlingumas skirtinguose variantuose siekė nuo 2,74 t ha⁻¹ iki 3,70 t ha⁻¹ (žr. 15 lentelę). Avižos yra vienas nereikliausių augalų, tad tiek kontroliniame variante, tiek variantuose, kur dirvožemio gerinimui ir augalų produktyvumui padidinti panaudotos komposto granulės, derlingumas esmingai nesiskyrė. Kaip ir vasarinių miežių atveju, mineralinės trąšos skatino augalų produktyvumo potencialo realizavimą.

Biomasės matavimas, atspindėjo tokias pat tendencijas kaip ir grūdų derlingumo atveju – didesnė biomasė užauginta variantuose, kuriuose panaudotos mineralinės trąšos. Papildomas seleno ar silicio trąšų panaudojimas statistiškai reikšmingos įtakos produktyvumui neturėjo. Tačiau pastebėta, kad seleno produkto panaudojimas tik mineralinėmis trąšomis tręštuose variantuose, leido avižoms pasiekti neženklų, bet didesnį grūdų derlingumą. Variantuose, kuriuose naudotos komposto granulės, aukštesni produktyvumo rodikliai fiksuoti papildomai panaudojus silicio turintį produktą, nei naudojant seleno produktą.

Biometrinės analizės parodė, kad lapija avižų biomasėje sudarė nuo 13 % kontroliniame variante iki 33 % variantuose, tręštuose mineralinėmis trąšomis. Statistinės analizės rezultatai parodė, kad nors ir nedidelės mineralinių trąšų normos augalams leido suformuoti didesnę lapiją, taip sukuriant didesnį fotosintetinį potencialą. Tai leido augalui labiau išnaudoti produktyvumo potencialą. Augalų stiebai sudarė nuo 26 % iki beveik 37 % (kontroliniame variante) viso biomasės kiekio.

15 lentelė. Sėjamųjų avių grūdų derlingumas ir biomasės derlius 2022 metais.

Variantai		Sausųjų medžiagų kiekis			
		Antžeminės dalies biomasės, g m ⁻²	Derlingumas, t ha ⁻¹	Stiebai, g m ⁻²	Lapai g m ⁻²
1	Kontrolė	597 a	2,741 ab	226,8 abc	80,4 a
2	N75 P60 K100	918 cd	3,601 cd	295,7 cdef	221,8 f
3	N75 P60 K100 + Se	939 d	3,698 cd	350,5 f	220,6 ef
4	N75 P60 K100 + Si	844 bcd	3,276 bcd	320,4 def	219,9 ef
5	Komposto granulės (N100)	692 b	2,915 abcd	210,6 abc	138,2 b
6	Komposto granulės (N100) + Se	623 ab	2,630 a	165,7 abcd	151,2 bc
7	Komposto granulės (N100) + Si	670 ab	2,739 ab	179,8 bcd	167,4 bcd
8	Komposto granulės (N100) + 30 kg N mineralinių trąšų	851 bcd	3,448 bcd	244,0 abcd	188,0 cdef
9	Komposto granulės (N100) + 30 kg N mineralinių trąšų + Se	806 bcd	3,323 bcd	229,6 abc	192,1 def
10	Komposto granulės (N100) + 30 kg N mineralinių trąšų + Si	929 cd	3,535 cd	257,5 bcd	185,7cdef

Pastaba. Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).

Žieminiai rugiai. Žieminiai rugiai prieš vasarinius javus yra pranašesni turėdami ilgesnį vegetacijos periodą, tai jiems suteikia pranašumą išnaudojant produktyvumo potencialą. Tačiau drėgmės stygius dažniausiai yra pagrindinis javų produktyvumą limituojantis veiksnys. Žieminių rugių derlingumas mažo našumo dirvožemyje 2023 m. siekė nuo 1,830 t ha⁻¹ (kontroliniame (netręštame) variante) iki daugiau kaip 3,8 t ha⁻¹ mineralinėmis trąšomis tręštuose variantuose (žr. 16 lentelę). Dėl drėgmės stygiaus komposto granulių poveikis buvo minimalus – derlingumai neturėjo esminių skirtumų lyginant su kontroliniu variantu. Skystų silicio trąšų panaudojimas papildomam tręšimui parodė nedidelę teigiamą tendenciją žieminių rugių derlingumui.

Naudotų priemonių poveikis žieminių rugių biomasės sukaupimui turėjo tokias pat tendencijas kaip ir grūdų derlingumui – didesnis produktyvumas pasiektas variantuose, kuriuose panaudotos mineralinės trąšos. Žieminiai rugiai suformuoja stambius, ilgus stiebus, tad didesniąją biomasės dalį sudarė žieminių rugių stiebai.

Produktyvių varpų skaičius ploto vienetu esmingai skyrėsi variantuose, kuriuose naudotos mineralinės trąšos arba derintos su komposto naudojimu. Azoto efektyvumo skaičiavimai parodė, kad efektyviau trąšos veikė 8, 9 ir 10 variantuose, kur taikyta mineralinių ir komposto trąšų derinimas. Šiuose variantuose vienas mineralinių azoto trąšų kilogramas leido pasiekti 32–36 kg grūdų derlingumo priedą. Variantuose, kuriose naudotos vien tik mineralinės trąšos vienas kilogramas azoto papildomai produkavo 24–26 g grūdų.

16 lentelė. Žieminių rugių grūdų derlingumas ir biomasės derlius 2023 metais.

Variantai		Sausųjų medžiagų kiekis			Produktyvių varpų skaičius, vnt. m ⁻²
		Antžeminės dalies biomasės, g m ⁻²	Derlingumas t ha ⁻¹	Stiebai, g m ⁻²	
1	Kontrolė	0,439 a	1,830 a	0,256 a	598 a
2	N75 P60 K100	0,863 bc	3,805 bc	0,483 bc	761 de
3	N75 P60 K100 + Se	0,851 bc	3,547 bc	0,497 c	763 d
4	N75 P60 K100 +Si	0,870 c	3,835 c	0,487 bc	751 de
5	Komposto granulės (N100)	0,444 a	1,852 a	0,259 a	645 abc
6	Komposto granulės (N100) + Se	0,464 a	1,935 a	0,271 a	632 ab
7	Komposto granulės (N100) + Si	0,490 a	2,045 a	0,286 a	625 ab
8	Komposto granulės (N100) + 45 kg N mineralinių trąšų	0,730 bc	3,460 bc	0,484 bc	695 bcde
9	Komposto granulės (N100) + 45 kg N mineralinių trąšų + Se	0,740 bc	3,310 bc	0,432 bc	709 cde
10	Komposto granulės (N100) + 45 kg N mineralinių trąšų + Si	0,788 bc	3,492 bc	0,439 bc	712 cde

Pastaba. Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).

Apibendrinimas. Panaudotos priemonės: komposto granulės, mineralinės trąšos ir jų deriniai turi įtakos augalų produktyvumui mažo našumo dirvožemiuose. Komposto granulės efektyviau veikia augalų produktyvumą jas derinant su mineralinėmis trąšomis – pasiektas geresnis derlingumo priedas. Smėlžemiuose augalų produktyvumą lemia ne tik panaudoti tręšimo produktai, bet ir aplinkos sąlygos, ypač kritulių kiekis vegetacijos periodu. Atsižvelgiant į tyrimų rezultatus, racionaliausias sprendimas mažo našumo dirvožemiuose auginti mažiau reiklius miglinius javus: avižas, žieminius rugius, o jų tręšimui naudoti organinių ir mineralinių trąšų derinį. Papildomai tręšiant silicio ar seleno trąšomis, statistiškai esmingo poveikio augalų produktyvumui nenustatyta.

2.1.6. Grūdų kiekybiniai ir kokybiniai rodikliai

Vasariniai miežiai. Analizuojant vasarinių miežių grūdų derlių lemiančius kiekybinius rodiklius, nustatyta, kad mineralinės trąšos ir jų derinimas su selenu ir siliciu esmingai padidino grūdų skaičių varpoje ($\approx 20,2\text{--}30,7\%$), taip pat ir 1000 grūdų svorį, kuris buvo $\approx 6,5\text{--}8,5\%$ didesnis negu netręštame variante (žr. 17 lentelę).

Vertinant kokybinius rodiklius, tendencijos išliko tokios pat, t. y. mineralinės trąšos ir jų derinimas su selenu ir siliciu didino grūdų baltymingumą nuo $43,8\%$ iki $50,6\%$, o piltinį tankį nuo 6% iki $7,6\%$, kai tuo metu krakmolo kiekis tręštuose variantuose buvo $\approx 3,3\text{--}3,7\%$ mažesnis negu netręštame variante.

17 lentelė. Skirtingų tręšimo variantų įtaka vasarinių miežių kiekybiniais ir kokybiniais rodikliams 2020 metais.

Variantai	Kiekybiniai rodikliai		Kokybiniai rodikliai		
	Grūdų sk. varpoje	1000 grūdų svoris (g)	Baltymai, %	Kraskmolos, %	Piltnis tankis, kg/100 l
1 Kontrolė	11,4 B	43,4 B	9,58 B	63,13 A	56,45 B
2 NPK	13,7 BA	47,1 A	14,43 A	60,80 B	60,75 A
3 NPK + Se	14,6 A	46,8 A	13,78 A	61,05 B	60,20 A
4 NPK + Si	14,9 A	46,2 BA	14,23 A	60,80 B	59,85 A

Pastaba. Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).

Dėl sausringo ir karšto laikotarpio 2021 m., kuris sutapo su grūdo užpildymo tarpsniu, nukentėjo vasarinių miežių grūdų kokybiniai rodikliai. 2021 m. grūdų kokybinių rodiklių rezultatai parodė, kad grūdų krakmolingumas buvo panašaus lygmens kaip ir 2020 m. (žr. 18 lentelę), bet vasarinių miežių 1000 grūdų masė buvo apie 30 % mažesnė lyginant su 2020 m. rezultatais. Grūdų baltymingumas tarp skirtingomis technologijomis tręštų variantų neturėjo esminių skirtumų.

18 lentelė. Skirtingų tręšimo technologijų įtaka vasarinių miežių kiekybiniais ir kokybiniais rodikliams 2021 metais.

Variantai	Kiekybiniai ir kokybiniai rodikliai			
	1000 grūdų svoris (g)	Baltymai, %	Kraskmolos, %	Piltnis tankis, kg/100 l
1 Kontrolė	29,74 BA	12,65 A	60,08 A	46,68 A
2 N100P80K140	34,35 A	13,20 A	61,00 A	48,10 A
3 N100P80K140 + Se	34,00 A	12,90 A	61,35 A	48,63 A
4 N100P80K140 + Si	31,74 BA	13,00 A	60,10 A	48,10 A
5 N60P35K60	29,01 BA	12,73 A	60,63 A	47,10 A
6 N60P35K60 + Se	30,07 BA	12,93 A	60,40 A	46,15 A
7 N60P35K60 + Si	28,78 BA	13,03 A	60,45 A	45,53 A
8 Komposto granulės (N170)	28,22 B	12,18 A	60,15 A	45,50 A
9 Komposto granulės (N170) + Se	28,12 B	12,63 A	60,18 A	45,73 A
10 Komposto granulės (N170) + Si	29,79 BA	12,63 A	59,98 A	46,48 A
11 Komposto granulės (N120) + 30 kg N mineralinių trąšų	31,03 BA	12,33 A	60,50 A	47,85 A
12 Komposto granulės (N120) + 30 kg N mineralinių trąšų + Se	30,24 BA	12,73 A	60,73 A	46,68 A
13 Komposto granulės (N120) + 30 kg N mineralinių trąšų + Si	31,04 BA	12,50 A	60,18 A	47,13 A

Pastaba. Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).

Dirvožemio agrocheminiai tyrimai (azoto kiekio) derliaus nuėmimo metu, parodė, kad azoto kiekis ariamajame sluoksnyje (0 – 30 cm) buvo panašus visuose variantuose ir variavo nuo 11,03 mg

kg⁻¹ iki 13,85 mg kg⁻¹. Statistiškai esmingų skirtumų tarp variantų nebuvo. Galima rasti sąsają su krituliais: vegetacijos metu, ypač augalų augimo pradžioje, buvo gausu kritulių, lauko eksperimente vyraujo lengvos granulimetrinės sudėties dirvožemis, kuriame maisto medžiagos galėjo lengvai migruoti į gilesnius sluoksnius. Esant tokioms sąlygoms, augalams maisto medžiagos tampa sunkiai prieinamos, ir jų stygius lemia tiek produktyvumo potencialo išnaudojimą, tiek pačios produkcijos kokybinius rodiklius.

Sėjamosios avižos. 2022 m. avižų grūdų baltymingumas variavo nuo 10,2 % iki 14,4 % (žr. 19 lentelę). Grūdų baltymingumas buvo didesnis netręštame variante (kontroliniame) ir vien tik kompostų tręštuose variantuose. Vidutinis vieno augalo suformuotų grūdų skaičiaus rodiklis parodė, kad avižos, augintos be mineralinių trąšų, grūdų suformavo esmingai mažiau nei augalai, tręšti vien tik mineralinėmis trąšomis ar komposto ir mineralinių azoto trąšų deriniu.

1000 grūdų masės rezultatai taip pat parodė, kad kontrolinio ir variantų, tręštų vien tik kompostu, augalai subrandino didesnės masės grūdus. Tokios 1000 grūdų masės tendencijos pažymėtos ir kitų tyrėjų publikacijose (Mohr ir kt., 2007). Iškelta hipotezė, kad augalai, jau nuo vegetacijos pradžios stokodami lengvai prieinamų maisto medžiagų, suformuoja mažesnę grūdų skaičių ant augalo, kai tuo metu tręšiami augalai suformuoja jų daugiau. Vegetacijos eigoje, pasireiškus drėgmės, maisto medžiagų stygiui ar kitam nepalankiam veiksniai, augalai subrandina mažesnės masės grūdus, bet jų skaičius būna didesnis.

19 lentelė. Avižų grūdų kokybiniai rodikliai tiksliajame lauko eksperimente 2022 metais, Vokė.

Grūdų kokybiniai rodikliai					
Variantai		Baltymai	Piltinis tankis, kg	1000 grūdų masė, g	Grūdų skaičius ant augalo (vidurkis), vnt.
1	Kontrolė	11,4 g	38,4 a	34,38 e	21,9 a
2	N75 P60 K100	10,5 abc	38,2 a	33,05 abc	32,8 bc
3	N75 P60 K100 + Se	10,5 abc	39,1 abc	32,63 ab	34,2 bc
4	N75 P60 K100 + Si	10,2 ab	38,9 abc	32,62 ab	33,9 bc
5	Komposto granulės (N100)	11,0 efg	39,7 abc	33,21 bc	23,3 a
6	Komposto granulės (N100) + Se	11,0 efg	39,0 abc	32,91 abc	23,6 a
7	Komposto granulės (N100) + Si	10,8 cde	40,2 bc	33,92 cde	21,9 a
8	Komposto granulės (N100) + 30 kg N mineralinių trąšų	10,8 cde	40,4 c	32,64 ab	33,1 bc
9	Komposto granulės (N100) + 30 kg N mineralinių trąšų + Se	10,6 bcde	39,7 abc	32,16 a	30,1 bc
10	Komposto granulės (N100) + 30 kg N mineralinių trąšų + Si	10,4 abc	40,3 bc	32,99 abc	34,9 bc

Pastaba. Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).

Žieminiai rugiai. 2023 m. žieminių rugių grūdų baltymingumas variavo nuo 9,1 iki 11,4% (žr. 20 lentelę). Komposto granulės poveikis grūdų baltymingumui buvo panašus kaip ir variantuose, kur

augalai tręšti derinant kompostą su mineralinėmis trąšomis. Esmingai didesnis grūdų baltymingumas buvo tik mineralinėmis trąšomis tręštuose variantuose. Grūdų piltinis tankis variavo nuo 68,1 iki 69,1 kg/100 l be esmingų skirtumų tarp variantų. Žieminių rugių 1000 grūdų masės rodiklio rezultatai parodė variaciją tarp variantų nuo 31,83 iki 36,06 g. Aukštesnės šio rodiklio vertės nustatytos variantuose kuriuose tręšimui naudotos vien tik mineralinės trąšos, arba derinus kompostą ir mineralines trąšas. Tokios pat tendencijos nustatytos vertinant vidutinį vieno augalo subrandintų grūdų skaičių.

20 lentelė. Žieminių rugių grūdų kokybiniai rodikliai tiksliajame lauko eksperimente 2023 metais, Vokė.

Variantai	Grūdų kokybiniai rodikliai			
	Baltymai	Piltinis tankis, kg	1000 grūdų masė, g	Grūdų skaičius ant augalo (vidurkis), vnt.
1 Kontrolė	9,2 ab	68,8 abcd	32,87 abc	21,5 a
2 N75 P60 K100	10,7 cd	68,1 a	34,28 bcde	33,0 cd
3 N75 P60 K100 + Se	11,2 cd	68,9 abcd	36,06 e	34,7 d
4 N75 P60 K100 + Si	11,4 d	68,4 abcd	35,42 de	33,8 cd
5 Komposto granulės (N100)	9,3 ab	68,6 abcd	32,83 abc	22,2 a
6 Komposto granulės (N100) + Se	9,1 a	68,3 ab	32,29 ab	22,0 a
7 Komposto granulės (N100) + Si	9,2 ab	68,9 abcd	31,83 a	23,7 a
8 Komposto granulės (N100) + 45 kg N mineralinių trąšų	9,4 ab	69,1 cd	34,61 cde	29,3 b
9 Komposto granulės (N100) + 45 kg N mineralinių trąšų + Se	9,6 ab	69,0 bcd	34,60 cde	31,8 bcd
10 Komposto granulės (N100) + 45 kg N mineralinių trąšų + Si	9,7 b	69,0 bcd	34,05 bcde	32,0 bcd

Pastaba. Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).

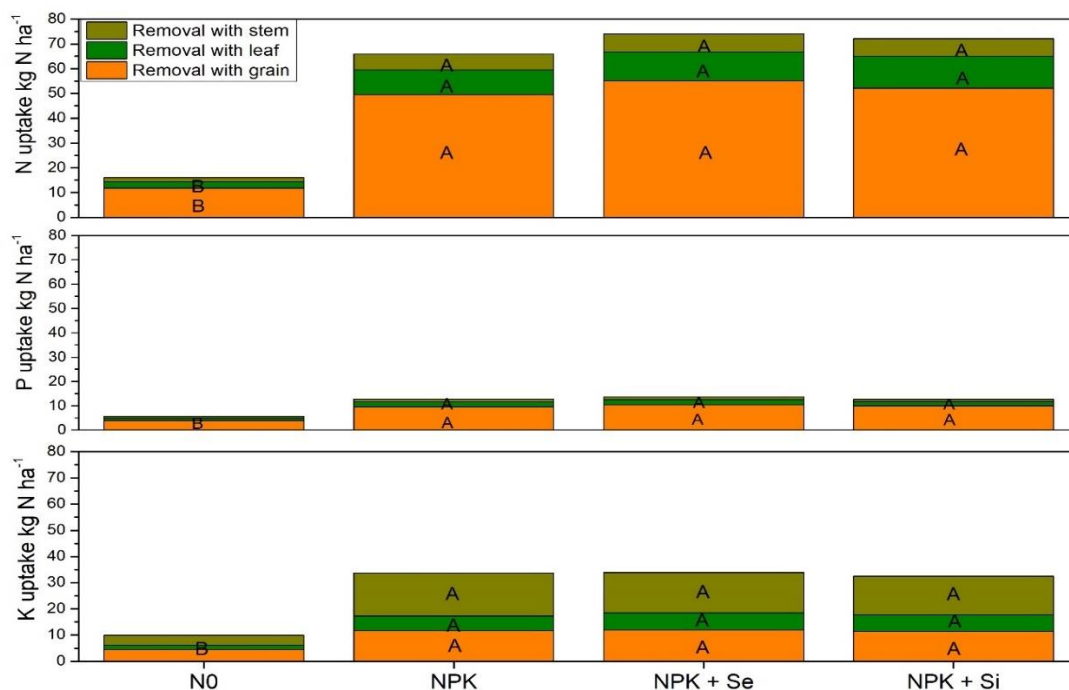
Apibendrinimas. Atlikti tikslieji lauko eksperimentai mažo našumo dirvožemyje parodė, kad miglinių javų grūdų kokybiniai rodikliai skyrėsi priklausomai nuo augintos augalų rūšies. Vasarinių miežių grūdų kokybiniais rodikliais nepavyko nustatyti esmingesnės panaudotų priemonių įtakos. Sėjamųjų avižų grūdų kokybiniai rodikliai aukštesni gauti tręšimui naudojant vien tik komposto granules. Žieminių rugių grūdų kokybinius rodiklius lėmė mineralinės trąšos, komposto granulės ir mineralinių azoto trąšų panaudojimas. Papildomas pasėlių tręšimas skystomis silicio trąšomis vasarinių javų pasėliuose esmingesnės įtakos grūdų kokybiniais rodikliais neturėjo, o žieminių rugių pasėlyje pastebėtos teigiamos tendencijos, tačiau jos neviršijo paklaidų ribos.

2.1.7. Cheminė biomasės sudėtis

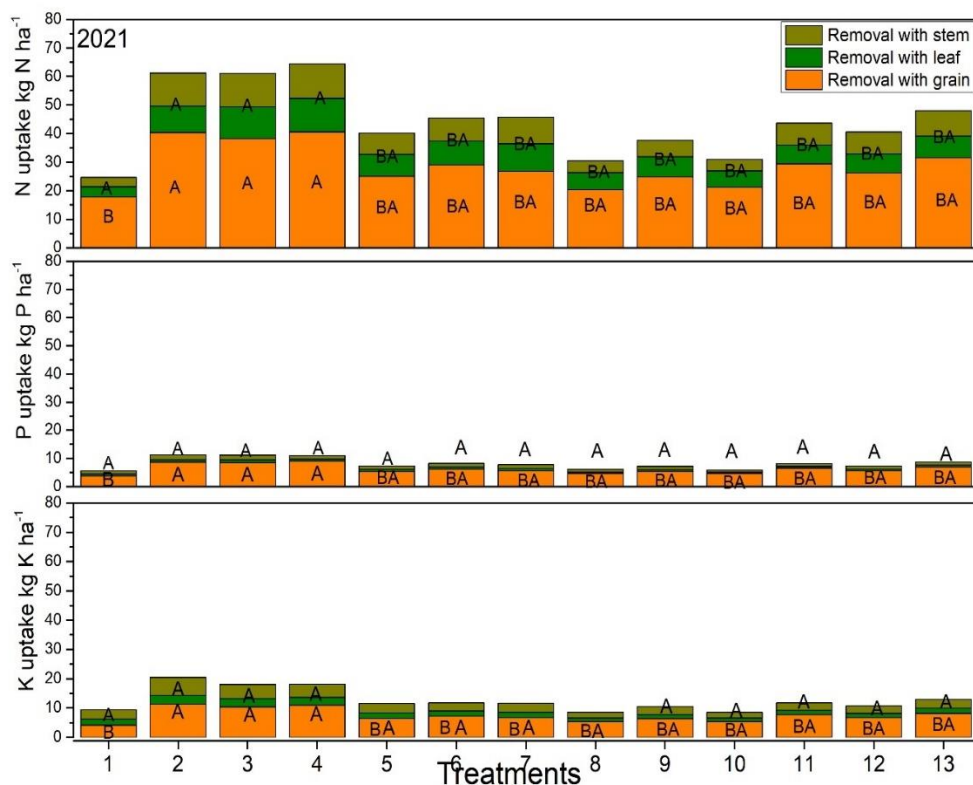
Vasariniai miežiai. Vasarinių miežių biomasės cheminės sudėties statistinė analizė parodė, kad 2020 m. didžiausia azoto dalis iš dirvožemio pernešta į vasarinių miežių grūdus (žr. 21 paveikslą). Mineralinėmis trąšomis tręštuose variantuose neesmingai daugiau azoto įsisavino augalai, kurie

papildomai purkšti seleno turinčiu produktu (3-asis variantas). Daugiau azoto lapuose nustatyta variante, kuriame panaudotas silicis. Fosforo vasariniams miežiams reikia sąlyginai ne daug (10 kg/t), tad augalų paimti fosforo kiekiai sąlyginai nedideli. Remiantis „Tręšimo planu“, vasarinių miežių poreikis kaliui buvo toks pat kaip ir azotui (21 kg/t), tačiau analizės, parodė, kad vasarinių miežių biomasėje kalio įsisavinta iki 35 kg ha⁻¹. Detalizuojant turimus tyrimų rezultatus, nustatyta, kad kalio daugiausiai sukaupta vasarinių miežių stiebuose, mažiau grūduose ir mažiausi kiekiai rasti lapuose. Vertinant tai, kad dažniausiai šiaudai derliaus nuėmimo metu susmulkinami ir paskleidžiami ant dirvos, planuojant tręšimą reikėtų vertinti tik su grūdais išnešamus maisto medžiagų kiekius. Tačiau, jeigu šiaudai paimami biokuro gamybos ar kitais tikslais, planuojant tręšimą reikėtų į tai atsižvelgti, kad būtų palaikytas stabilus dirvožemio maisto medžiagų balansas.

Atlikus 2021 m. augintų vasarinių miežių biomasės cheminės sudėties analizes, pastebėta, kad daugiausiai azoto sukaupta grūduose (žr. 22 paveikslą). Daugiausiai azoto su grūdais išnešta 2–4 variantuose, kurie intensyviau tręšti mineralinėmis trąšomis, tačiau skirtumai, lyginant su kitais variantais, nebuvo esminiai. Mažiausiai azoto sukaupė augalai, auginti kontroliniame (1 variante) ir 8–10 variantuose, kuriuose tręšimui naudotos tik komposto granulės. Fosforo ir kalio taip pat daugiausiai sukaupta grūduose, o didesni kiekiai šių elementų sukaupiti augalinėje biomasėje 2–4 variantuose, kurie intensyviai tręšti mineralinėmis trąšomis. Panašaus lygmens medžiagų sukaupimas vasarinių miežių biomasėje matomas 5–7 ir 11–13 variantuose. 5, 6 ir 7 variantai tręšti mineralinėmis trąšomis (N60 P 35 K60). 11–13 variantai tręšti komposto granulėmis ir papildomai N30 mineralinių trąšų norma.



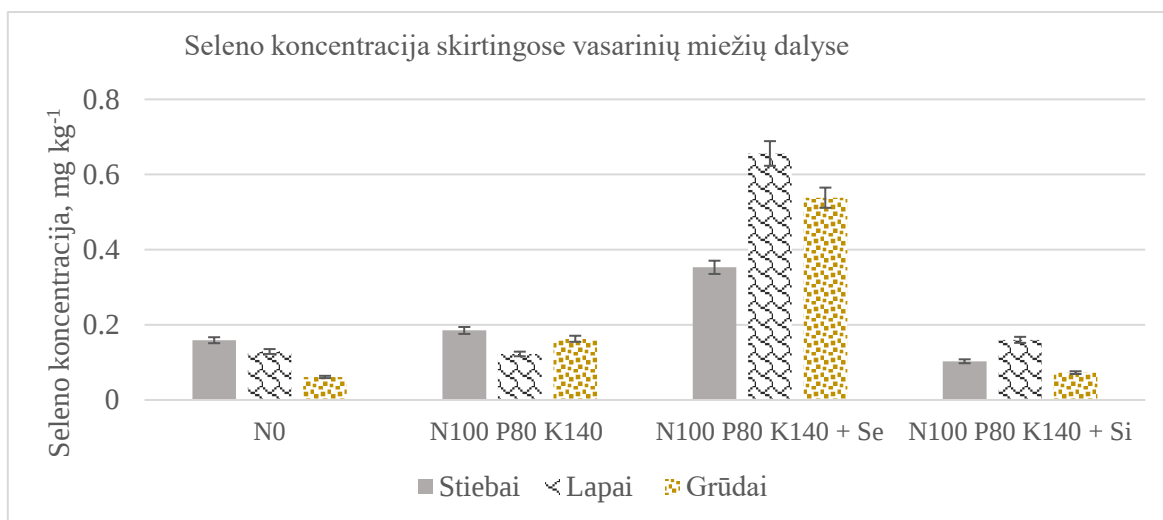
21 paveikslas. Azoto, fosforo ir kalio įsisavinimas skirtingose vasarinių miežių biomasės dalyse 2020 metais. *Pastaba.* Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).



1. Kontrolė; 2. N100P80K140; 3. N100P80K140 + Se 4. N100P80K140 + Si; 5. N60P35K60; 6. N60P35K60 + Se; 7. N60P35K60 + Si; 8. Komposto granulės (N170); 9. Komposto granulės (N170) + Se; 10. Komposto granulės (N170) + Si; 11. Komposto granulės (N120) + N30 mineralinių trąšų; 12. Komposto granulės (N120) + N30 mineralinių trąšų + Se; 13. Komposto granulės (N120) + N30 mineralinių trąšų + Si;

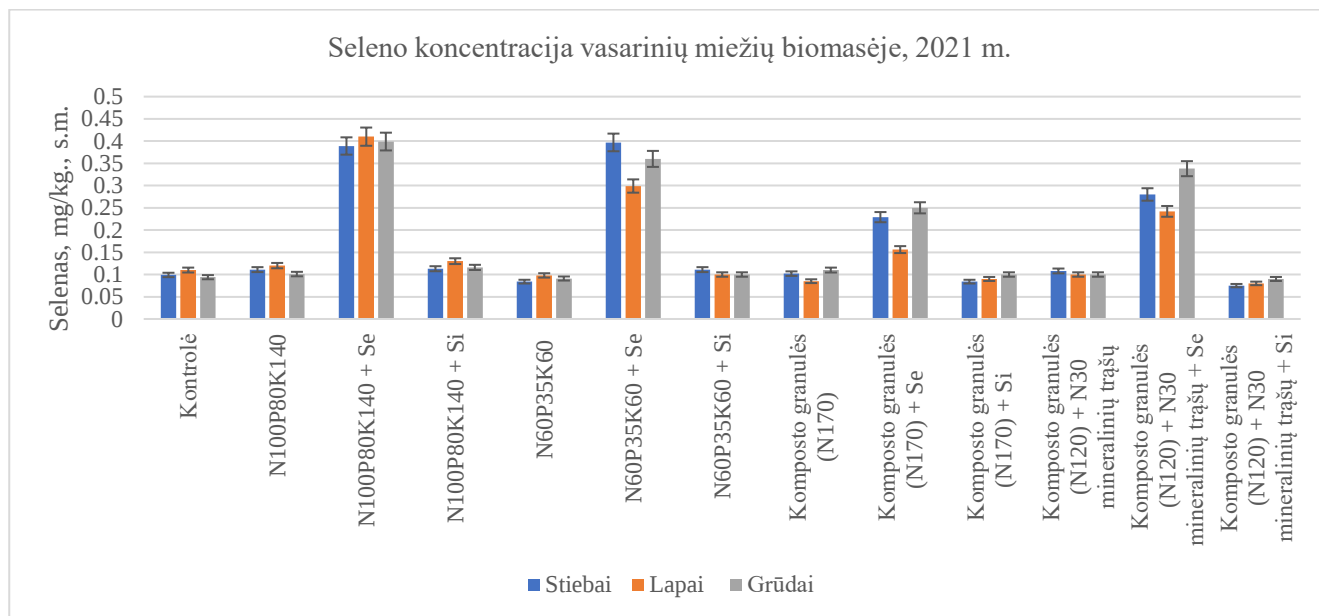
22 paveikslas. Azoto, fosforo ir kalio įsisavinimas skirtingose vasarinių miežių biomasės dalyse 2021 metais. *Pastaba. Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).*

Siekiant didinti vasarinių miežių grūdų produktyvumą ir kurti didesnės pridėtinės vertės produkciją, papildomam tręšimui panaudotas seleno turintis produktas. 2020 m. vasarinių miežių biomasės cheminės analizės rezultatai parodė, kad daugiausiai seleno susikaupė lapuose ir grūduose, mažiau stiebuose (žr. 23 paveikslą). Variantuose, kuriuose nenaudotas seleno turintis produktas, taip pat rasti nedideli seleno kiekiai.



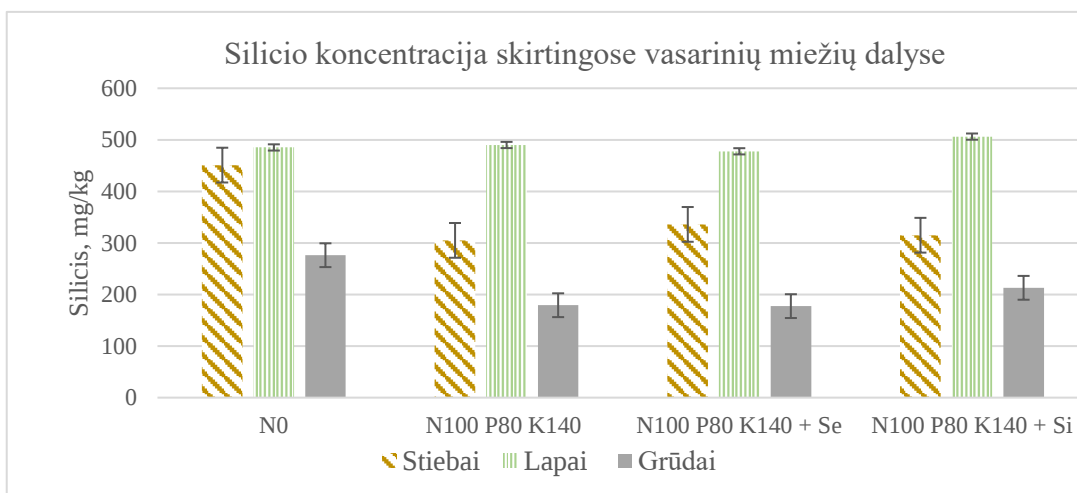
23 paveikslas. Seleno koncentracija vasarinių miežių augaluose 2020 metais.

2021 m. seleno koncentracija vasarinių miežių augaluose ir atskirose jų dalyse variavo paklaidų ribose (žr. 24 paveikslą), išskyrus variantus, kuriuose papildomai panaudoti seleno turintys tręšimo produktai. Lyginant variantus, kuriuose panaudotos seleno turinčios trąšos, tarpusavyje pastebima tendencija, kad didesni seleno kiekiai sukaupti augalų biomasėje, kur panaudotos vien tik mineralinės trąšos. Variantuose, kuomet naudotas tik kompostas arba derintas komposto ir mineralinių azoto trąšų naudojimas, seleno sukaupta mažiau.

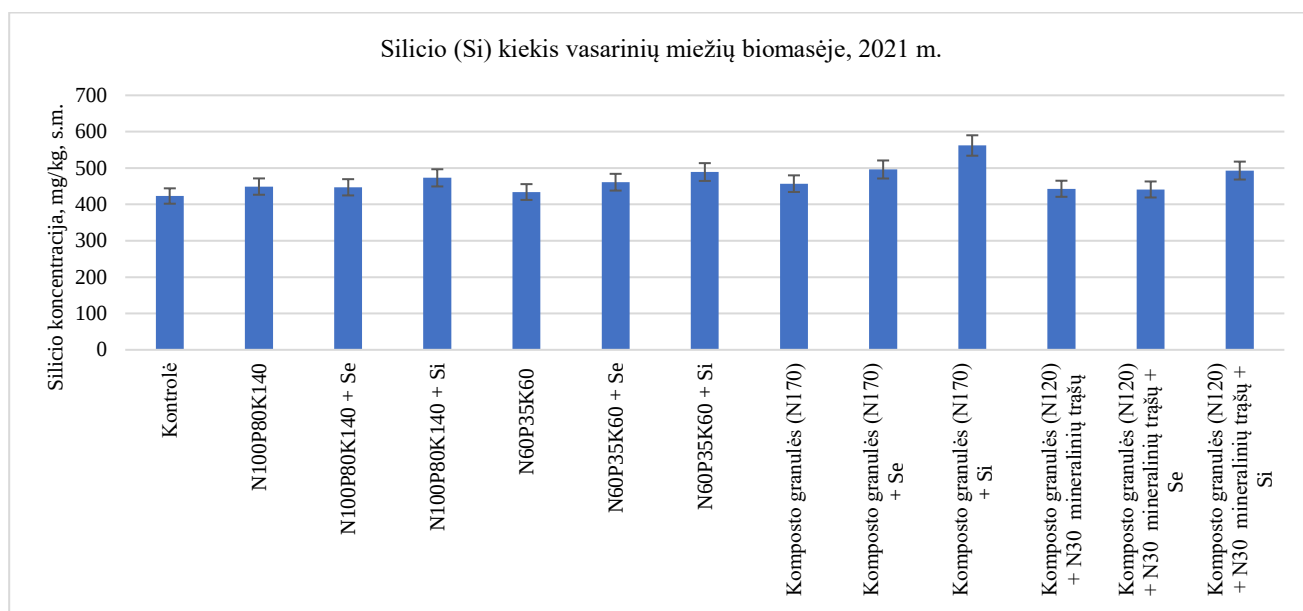


24 paveikslas. Seleno koncentracija vasarinių miežių augaluose 2021 metais.

Jei silicio turinčio produkto panaudojimas turėjo tam tikrą teigiamą tendenciją vasarinių miežių grūdų kiekybiniais ir kokybiniais rodikliais, tai jo koncentracija augalų biomasėje tarp variantų neturėjo ryškesnių tendencijų abejais tyrimų metais (žr. 25 ir 26 paveikslus). Tikėtina, kad tai galėjo lemti ir natūraliai gamtoje esantis didelis silicio kiekis: silicis yra antras labiausiai paplitęs dirvožemio elementas, mineralinis substratas didžiajai pasaulio augalų daliai. Silicis lengvai absorbuojamas, todėl sausumos augaluose jo yra pakankamai didelės koncentracijos – nuo 1 % sausosios medžiagos dalies iki kelių procentų ar net daugiau (Epstein, 1994). Nepaisant to, kad silicis yra viena iš mineralinių augalų sudedamųjų dalių, jis nėra priskiriamas prie elementų ar maistinių medžiagų, kurias reikėtų įvardinti kaip „būtiną“. Pateikiama daugybė įrodymų, kad silicis, kai jis lengvai prieinamas augalams, vaidina svarbų vaidmenį jų augime, mineralinėje mityboje, mechaniniame stiprume ir atsparume grybelinėms ligoms ir nepalankioms sąlygoms.

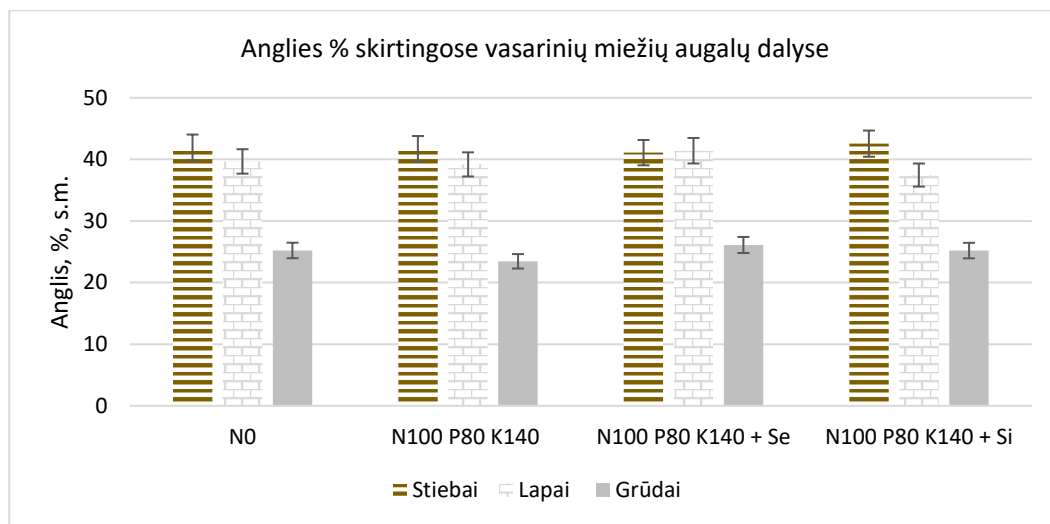


25 **paveikslas.** Silicio kiekis skirtingose vasarinių miežių biomasės dalyse 2020 metais.



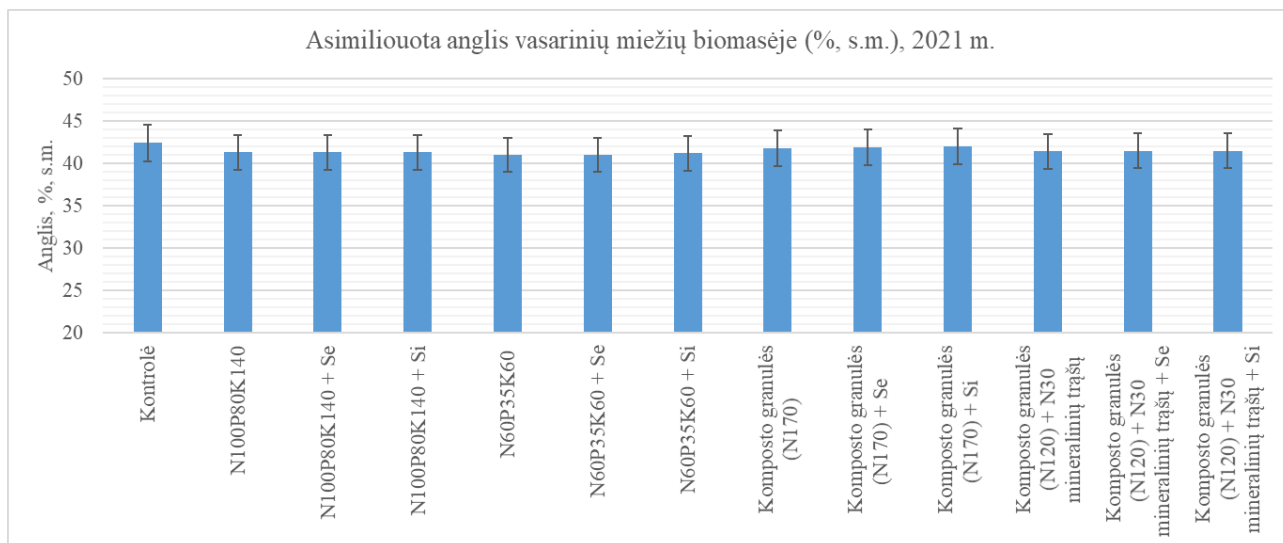
26 **paveikslas.** Silicio kiekis vasarinių miežių biomasėje 2021 metais

2020 m. atliktos biomasės analizės parodė, kad vasariniai miežiai stiebuose gali akumuliuoti apie 40 % anglies (s.m.) (žr. 27 paveikslą). Nepriklausomai nuo tręšimo, apie 40 % anglies sukaupta vasarinių miežių lapuose. Grūduose anglies akumuliuota mažiau nei lapuose ar stiebuose.



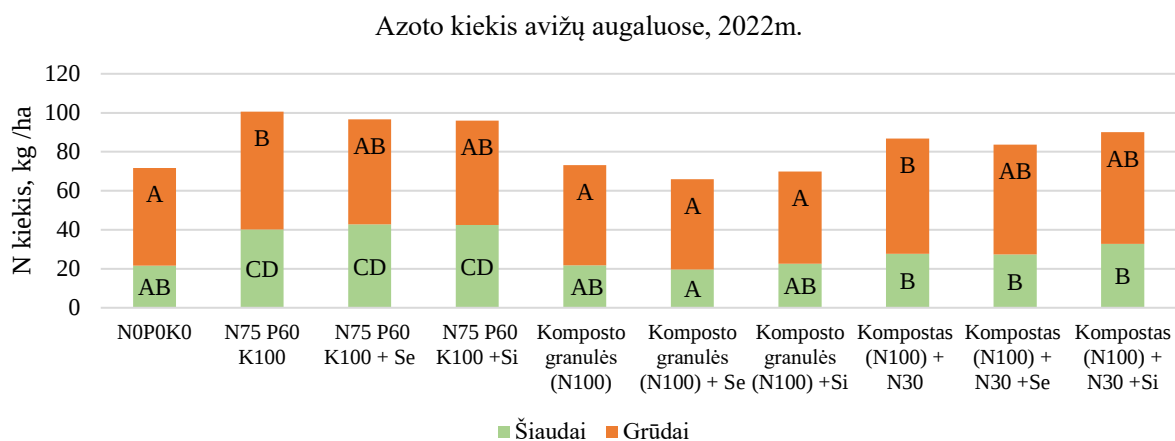
27 paveikslas. Anglies (% s.m.) asimiliavimas skirtingose vasarinių miežių augalo dalyse 2020 metais.

2021 m. atliktas vasarinių miežių biomasėje akumuliuotos anglies kiekio vertinimas (žr. 28 paveikslą) parodė, kad skirtumai tarp variantų nebuvo statistiškai esmingi, tačiau pastebima tendencija, kad daugiau anglies asimiliavo netręšti, arba vien tik organinėmis trąšomis tręšti augalai.



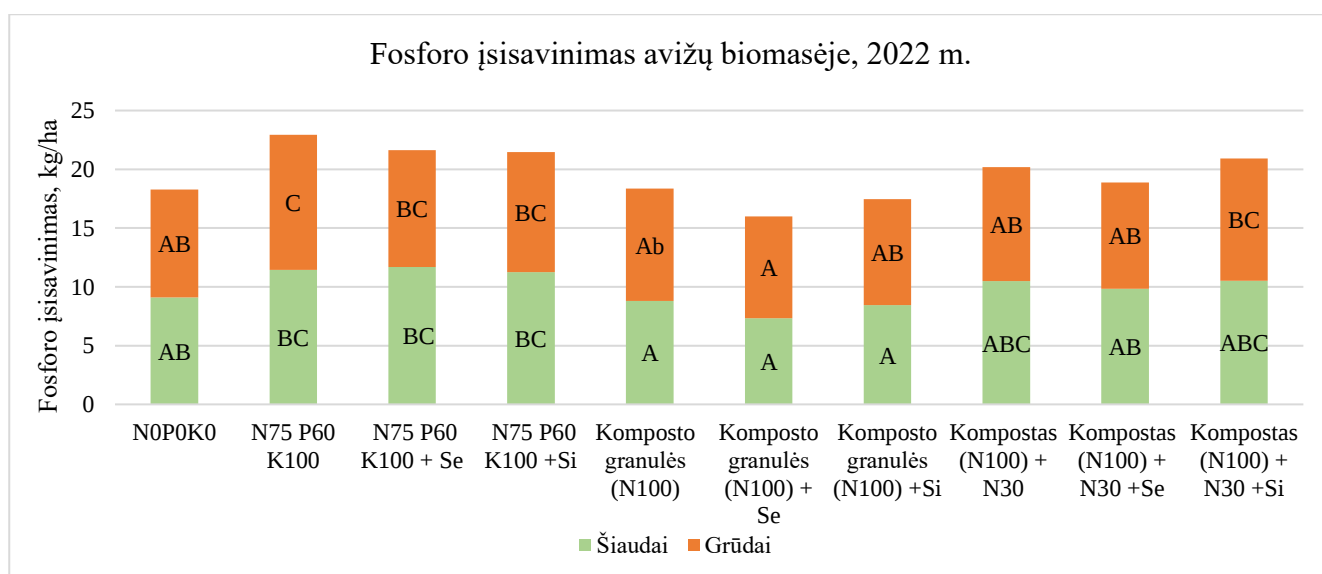
28 paveikslas. Asimiliuota anglis (%) vasarinių miežių biomasėje 2021 metais.

Sėjamosios avižos. Sėjamųjų avižų grūdų cheminių analizių rezultatai parodė, kad avižos įsisavino nemažai azoto (žr. 29 paveikslą). Didžioji dalis azoto buvo grūduose – koncentracija variavo nuo 1,6 % iki 1,86 %, o šiauduose azoto koncentracija variavo nuo 0,6 % iki 0,8 %. Augalai efektyviau įsisavina mineralinių trąšų azotą, kai tuo metu su kompostu įneštas azotas dirvožemyje atsipalaiduoja lėčiau ir augalams vegetacijos metu gali susidaryti maisto medžiagų stygius, kas lemia mažesnę produktyvumą.



29 paveikslas. Azoto kiekis avių grūduose ir šiaudų biomasėje 2022 metais.
 Pastaba. Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).

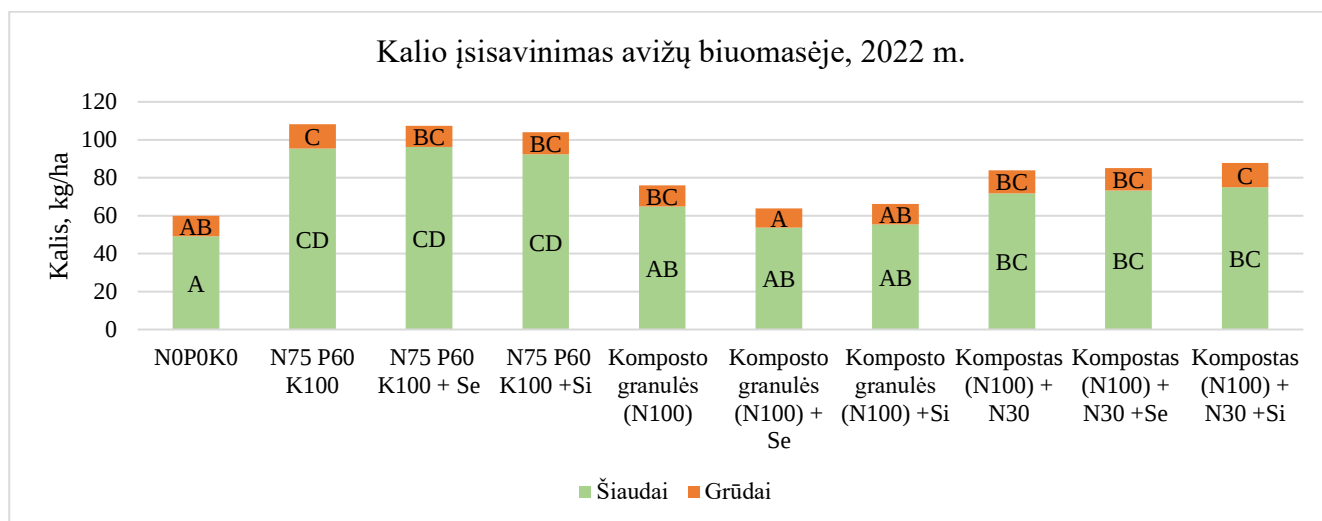
Avižoms, kaip ir kitiems migliniams javams fosforo reikia mažiau nei azoto ar kalio. 2022 m. auginant avižas mažo našumo dirvožemyje, nustatyta, kad fosforo koncentracija šiauduose variavo nuo 0,18 % iki 0,28 %, ir paskaičiavus kiek visas avių pasėlis paimtų fosforo iš vieno hektaro ploto, gauta, kad didesni kiekiai būtų paimti iš variantų, kuriuose naudojamos mineralinės trąšos (žr. 30 paveikslą).



30 paveikslas. Avių augalų įsisavintas fosforo kiekis 2022 metais.
 Pastaba. Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).

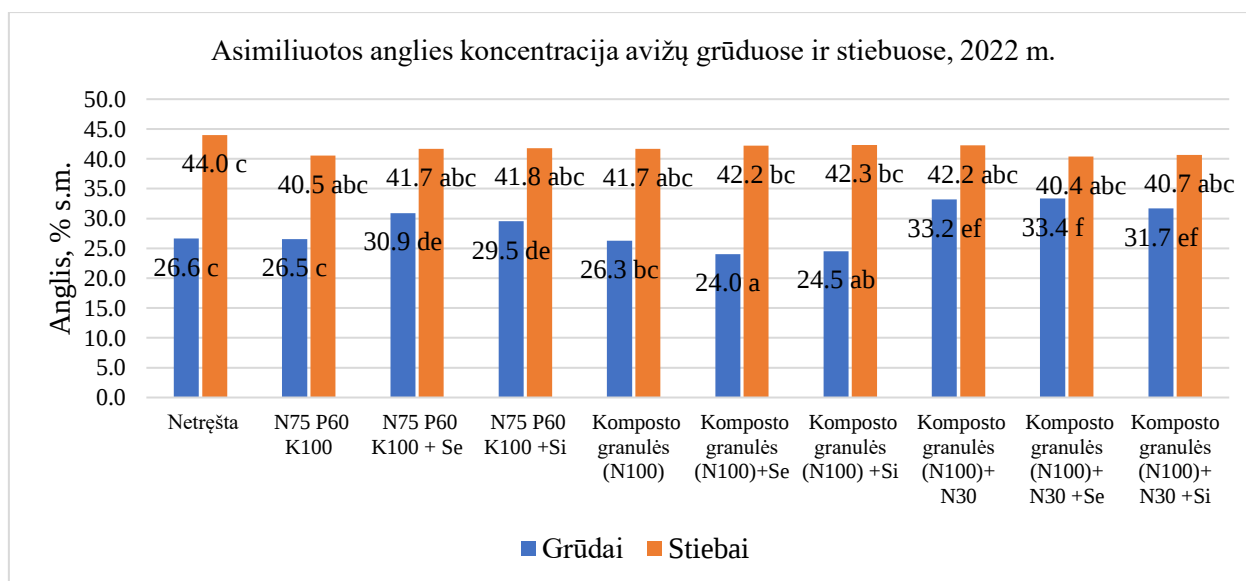
Daugiausiai su avių šiaudais iš dirvožemio paimta kalio (žr. 31 paveikslą). Šiauduose kalio koncentracija siekė nuo 1,4 % iki 1,93 %, tad avių šiaudų užauginimui variantuose, kuriuose naudotos vien tik mineralinės kalio trąšos, galėjo būti įsisavintas beveik visas jų kiekis. Panašias kalio koncentracijas augalų šiauduose nurodo ir lenkų tyrėjai (Kosiorek, Wyszowski, 2019). Kalio

koncentracija avių grūduose buvo kelis kartus mažesnė nei šiauduose ir variavo nuo 0,35 % iki 0,4 %.



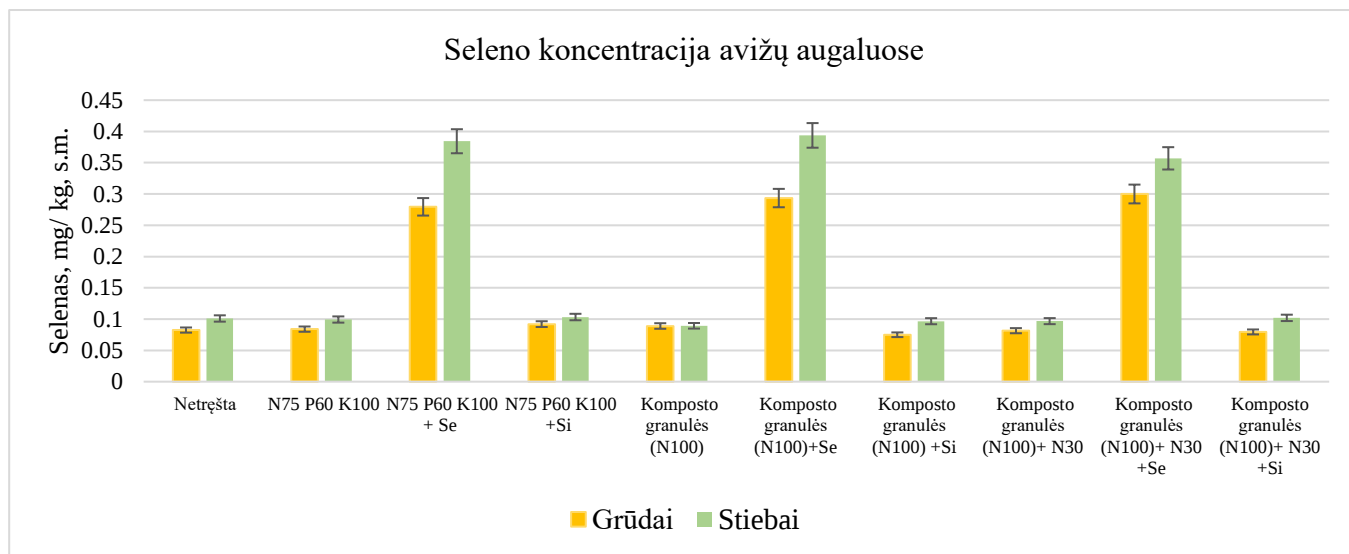
31 paveikslas. Avių augalų asimiliuotas kalis, taikant skirtingas tręšimo technologijas 2022 metais.
Pastaba. Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).

Praktikoje šiaudai, dažniausiai, derliaus nuėmimo metu, yra susmulkinami ir paskleidžiami lauke, tad sudaroma galimybė tam tikrai daliai maisto medžiagų grįžti į dirvožemį, taip pat įnešama fotosintezės metu asimiliuota anglis, kurios augalai sukaupia pakankamai daug – avių šiauduose jos nustatyta nuo 40,4 % iki 44 % (žr. 32 paveikslą). Sąlyginai didesnis kiekis nustatytas netręštame variante ir variantuose, kuriuose tręšta vien tik kompostu. Grūduose anglies koncentracija mažesnė nei šiauduose – skirtinguose variantuose nustatyta nuo 24 % iki daugiau kaip 33 %, o esmingai didesni kiekiai nustatyti variantuose kuriuose panaudotos mineralinės trąšos. Skystų seleno ar silicio trąšų panaudojimas neturėjo įtakos anglies kaupimui augalų biomasėje.



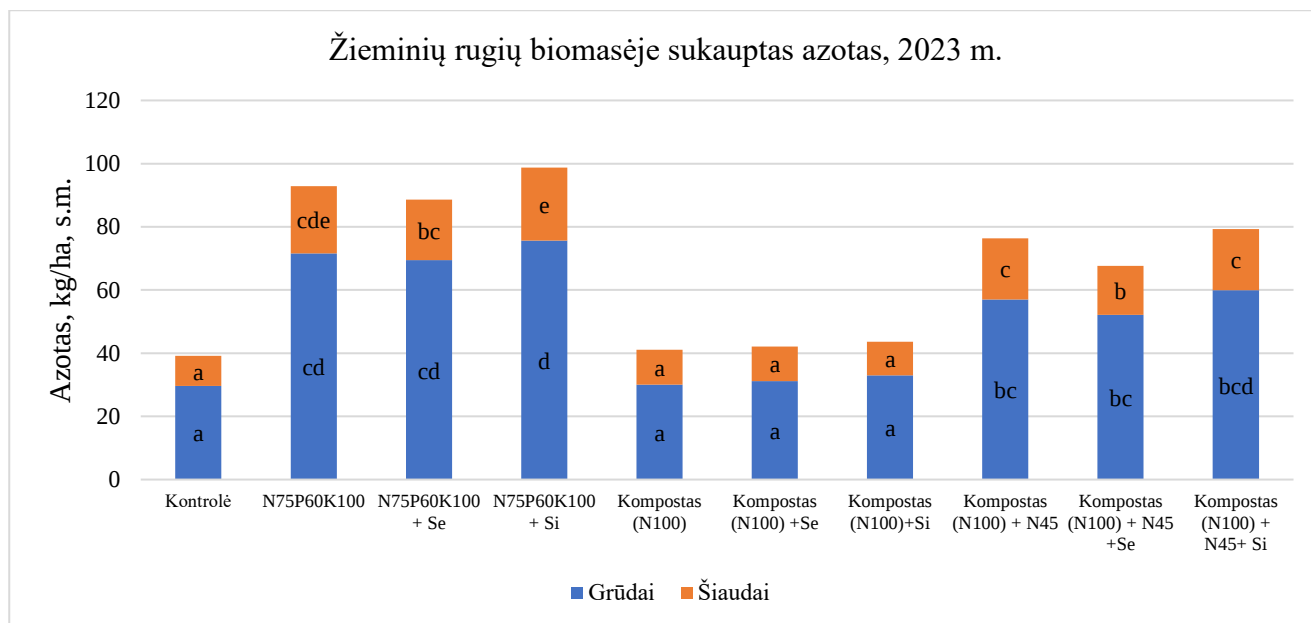
32 paveikslas. Anglies asimiliacija sėjamųjų avių augaluose 2022 metais.

Seleno koncentracijos analizės rezultatai parodė panašias tendencijas kaip vasariniuose miežiuose – daugiausiai šio elemento rasta tik tuose variantuose, kuriuose panaudotos skystos seleno trąšos (žr. 33 paveikslą). Daugiau seleno nustatyta avižų šiauduose, nei grūduose. Silicio analizių rezultatai parodė panašias tendencijas kaip ir vasarinių miežių atveju, šio elemento kiekiai tarp variantų buvo panašūs – papildomas tręšimas šiomis trąšomis neturėjo esmingesnės įtakos jo kiekiui augalų biomasėje.



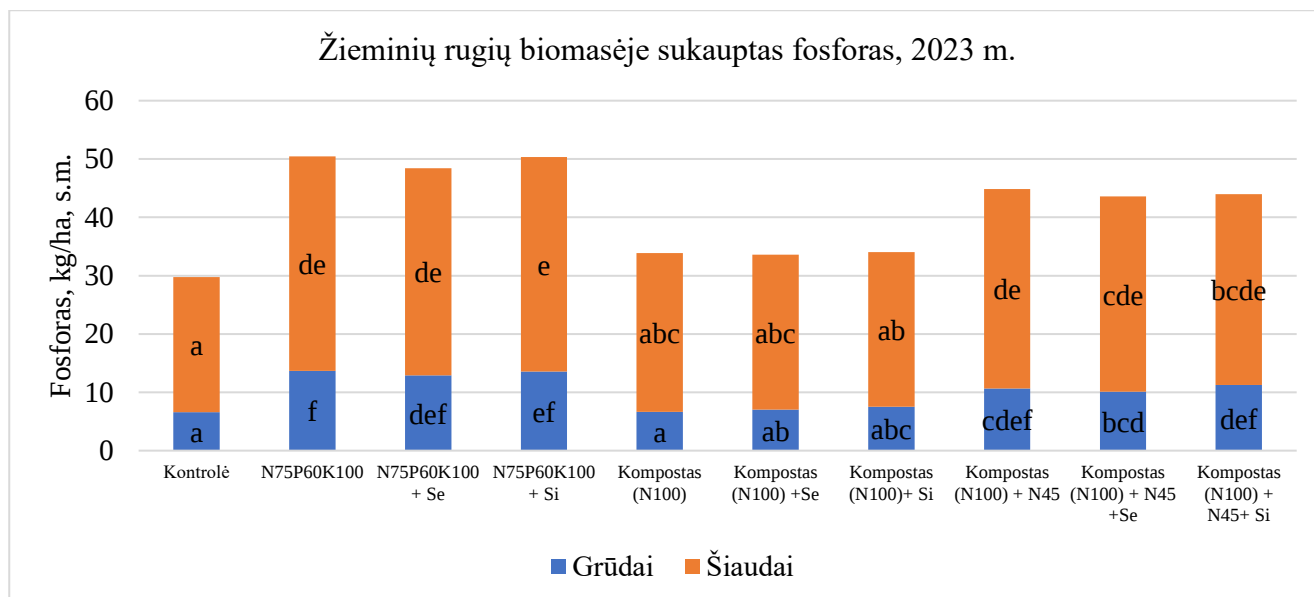
33 paveikslas Seleno koncentracija sėjamųjų avižų augaluose 2022 metais.

Žieminiai rugiai. Žieminių rugių augaluose didžioji dalis azoto sukaupiama grūduose (žr. 34 paveikslą). Grūduose azoto nustatyta nuo 1,51 % (netręštame variante) iki 2,04 % tik mineralinėmis trąšomis tręštuose variantuose (2–4 variantai). Šiauduose šis kiekis mažesnis – siekė nuo 0,32 % iki 0,48 %. Perskaičiavus, kiek azoto asimiliuota žieminių rugių biomasėje, tendencijos kartojasi kaip ir ankstesniais metais – augalai daugiausiai azoto įsisavino variantuose, kurie tręšti mineralinėmis trąšomis (žr. 34 paveikslą). Augalai grūduose sukaupė nuo 30 kg/ha kontroliniame variante iki 75 kg/ha tręšiant mineralinėmis trąšomis ir papildomai panaudojus skystas silicio trąšas. Stiebų biomasėje žieminiai rugiai sukaupė nuo 9,5 kg/ha (kontrolinis variantas) iki daugiau nei 23 kg/ha (N75P60K100 + Si (4 variantas)). Analizių rezultatai parodė, kad variantuose, kuriuose papildomai panaudotos silicio trąšos, grūduose azoto sukaupta daugiau – nuo 0,04 % iki 0,12 %. lyginant su tais pačiais tręšimo variantais, kuriuose nenaudotos silicio trąšos. Tokia pati tendencija pastebima ir žieminių rugių šiaudų analizių rezultatuose.



34 paveikslas. Azoto kiekis žiemiųjų rugių grūduose ir šiaudų biomasėje 2023 metais.
Pastaba. Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).

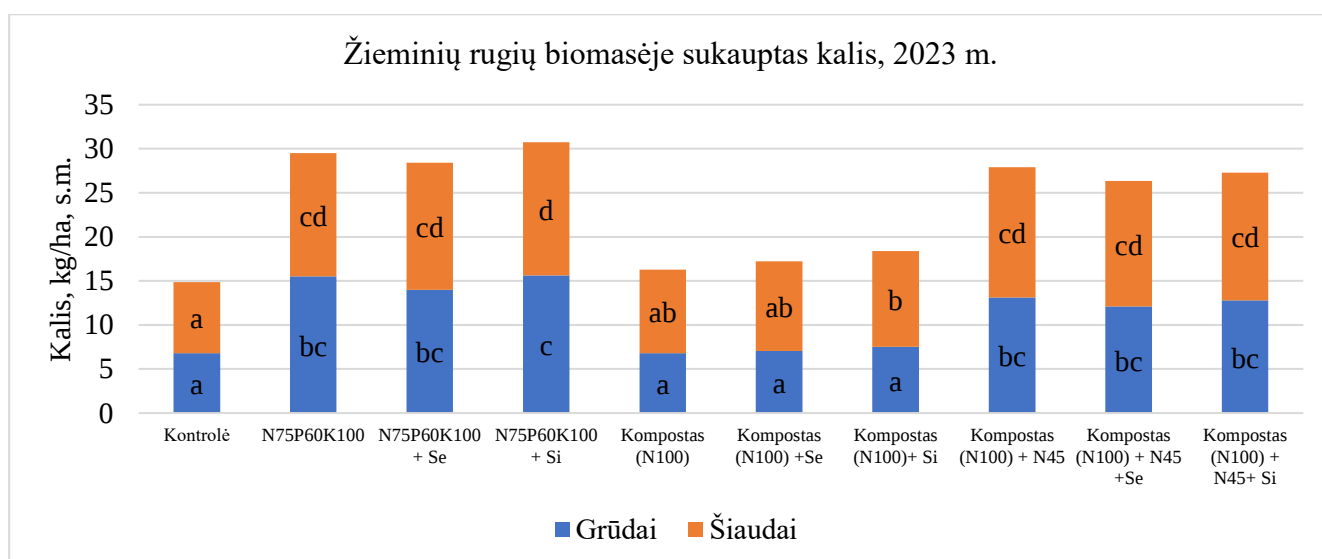
Žiemiųjų rugių augaluose didesnė fosforo dalis asimiliuota šiauduose (žr. 35 paveikslą). Stiebuose sukaupto fosforo kiekis variavo nuo $23,2 \text{ kg ha}^{-1}$ kontroliniame (netręštame) variante iki daugiau kaip 36 kg ha^{-1} mineralinėmis ir silicio trąšomis tręštame variante. Su grūdų derliumi iš lauko fosforo išnešta nuo $6,5 \text{ kg ha}^{-1}$ netręštame variante, iki kiek daugiau nei 13 kg ha^{-1} mineralinėmis trąšomis tręštuose variantuose. Atliktos grūdų cheminės analizės parodė, kad skirtinguose eksperimento variantuose užaugintuose grūduose fosforas sudarė nuo 0,3 % iki 0,37 % sausosios medžiagos, kai stiebuose jis skirtinguose variantuose variavo 0,07 % iki 0,1 % sausosios medžiagos. Bendras su užauginta biomase išnešamas fosforo kiekis artimas su trąšomis įnešam kiekiui. Kadangi šiaudai paliekami lauke, tai galima daryti prielaidą, kad dalis fosforo, skaidantis biomasei, vėl patenka į dirvožemį, ir gali būti asimiliuotas kitų sėjomainos augalų. Taip pat dalis su mineralinėmis trąšomis įnešto fosforo gali pereiti į įvairius dirvožemio junginius, kuriuose jis tampa sunkiai prieinamas augalams.



35 Pavaišklas. Fosforo kiekis žieminių rugių grūduose ir šiaudų biomasėje 2023 metais.

Pastaba. Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).

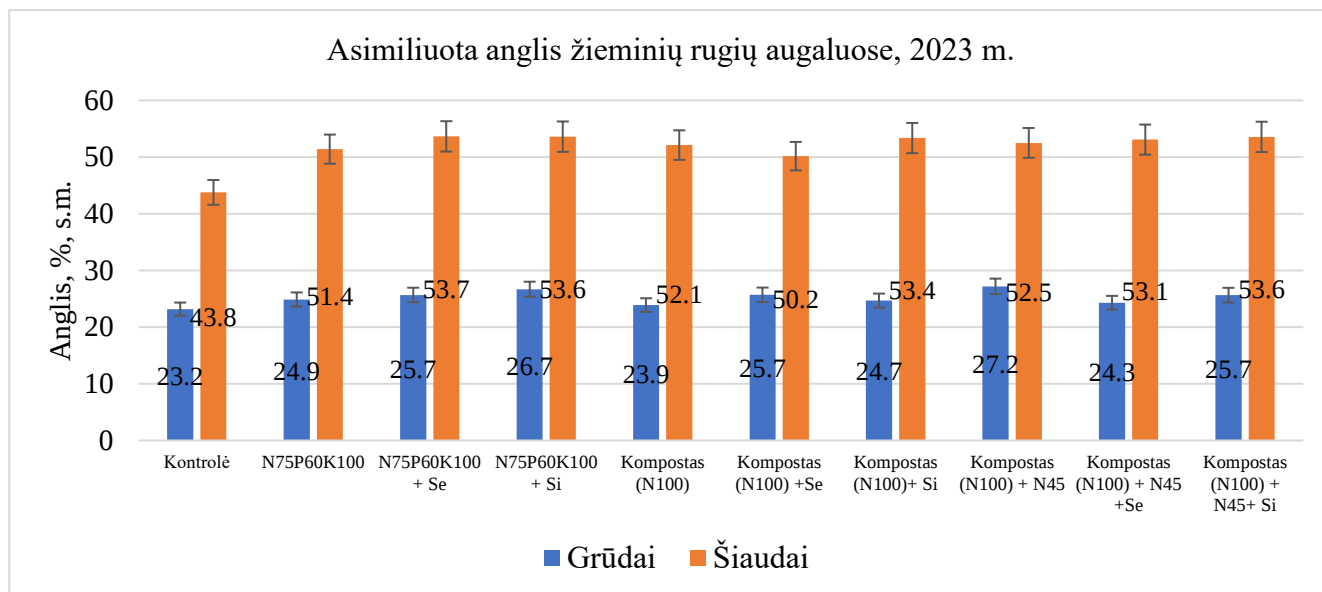
Kalio koncentracijos augaluose analizės rezultatai parodė, kad skirtingai nuo vasarinių javų, žieminių rugių augaluose kalio kiekis sukauptas grūduose ir stiebuose buvo panašus: grūduose nuo $6,8 \text{ kg ha}^{-1}$ iki $15,6 \text{ kg ha}^{-1}$, o šiauduose nuo $8,0$ iki $15,1 \text{ kg ha}^{-1}$ (žr. 36 paveikslą). Nustatytas kalio kiekis grūduose variavo nuo 0,38 % iki 0,44 %. Šiauduose kalio buvo rasta nuo 0,25 % iki 0,38 %. Gauti rezultatai verčia peržiūrėti tręšimo planavimą, tikėtina, kad, esant netipingoms vegetacijos sąlygoms (drėgmės stygiui, aukštesnėms temperatūroms), augalai nesugebės įsisavinti visų mineralinių trąšų.



36 paveikslas. Kalio kiekis žieminių rugių grūduose ir šiaudų biomasėje 2023 metais.

Pastaba. Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).

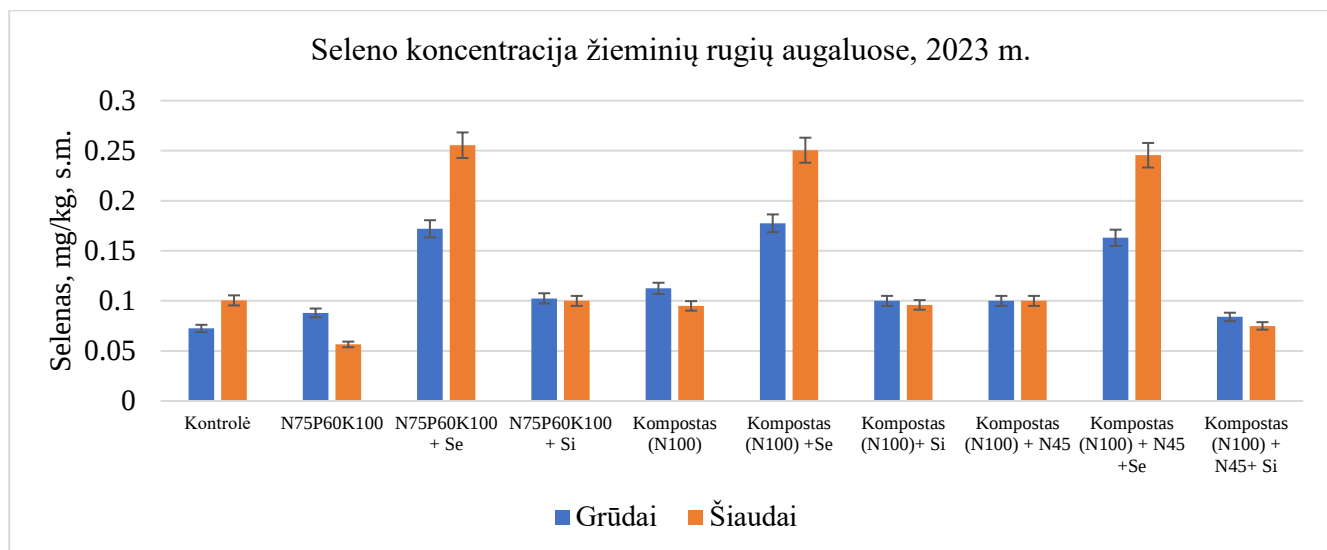
Anglies koncentracijos analizių rezultatai parodė, kad žieminių rugių šiauduose anglis sudarė nuo 43,8 % iki 53,7 %, o grūduose nuo 23,2 % iki 27,2 % (žr. 37 paveikslą). Anglies koncentracijos žieminių rugių stiebuose rezultatai skiriasi nuo vasarinių javų rezultatų. Kontrolinio (netręšto) varianto anglies koncentracija panašaus lygio, kaip ir vasariniuose javuose, kuri nustatyta 2020–2022 m., tačiau tręštuose variantuose anglies koncentracijos nustatytos esmingai aukštesnės nei kontroliniame variante. Žieminių rugių grūduose asimiliuotos anglies koncentracija buvo panaši kaip ir vasariniuose javuose, išskyrus sėjamųjų avižų rezultatus.



37 paveikslas. Žieminių rugių augaluose asimiliuotos anglies koncentracija, 2023 metais.

Žieminių rugių papildomam tręšimui naudotos skystos seleno ir silicio trąšos. Žieminių rugių biomasės cheminės analizės parodė, kad tarp skirtingų tręšimo variantų esmingų silicio kiekio skirtumų nerasta – koncentracija variavo nuo 650 iki 705 mg/kg.

Seleno kiekio žieminių rugių augaluose analizės parodė, panašias tendencijas kaip ir vasarinių javų atvejais 2020–2022 m. Esmingai didesni seleno kiekiai nustatyti tik tuose variantuose, kuriuose papildomai tręšta skystomis seleno trąšomis (žr. 38 paveikslą). Selenu tręštuose variantuose didesnis seleno kiekis buvo šiauduose – nuo 0,255 iki 0,260 mg kg⁻¹ s.m., o grūduose šio elemento buvo nuo 0,16 iki 0,18 mg kg⁻¹ s.m. Vertinant gautus rezultatus, kyla hipotezė, kad žieminiuose rugiuose mažesnė seleno koncentracija gauta dėl drėgmės stygiaus vegetacijos metu ir apribota augalų geba įsisavinti skystas trąšas.



38 paveikslas. Seleno koncentracija žieminių rugių augaluose, 2023 m.

2023 m., po eksperimento pabaigos atlikti dirvožemio agrocheminių rodiklių tyrimai dirvožemio ariamajame sluoksnyje (0-30 cm). Daugelio rodiklių vertės tarp variantų nesiskyrė esmingai (žr. 21 lentelę). Dirvožemio pH vertės tarp variantų pasižymėjo didesne variacija, o aukštesnės šio rodiklio vertės nustatytos variantuose, kuriuose tręsimui naudotos komposto granulės. Organinės anglies pokyčiai per projekto laikotarpį minimalūs, lyginant su pradiniais tyrimų rezultatais šis rodiklis padidėjo tik 0,06–0,15%. pH rodiklio vertės pakito nuo 0,2 iki 0,9 vieneto. Esmingesniems dirvožemio rodiklių pokyčiams reikalingas ilgesnis tyrimų laikotarpis, nes per pirmuosius kelis metus dažnai pastebimos minimalios pokyčių tendencijos.

21 lentelė. Dirvožemio ariamojo sluoksnio (0–30 cm) agrocheminių rodiklių vertės po derliaus nuėmimo 2023 metais.

Variantas	C _{org.} , %	pH	N min. mg/kg	N bendras, %	P ₂ O ₅ mg/kg	K ₂ O mg/kg
1. Kontrolė	1,40 ab	5,7 a	5,24 ab	0,106 ab	227 ab	131 ab
2. 4N75P60K100	1,49 b	5,9 a	6,00 ab	0,114 b	241 ab	172 b
3. N75P60K100 + Se	1,45 ab	5,7 a	6,19 ab	0,100 ab	244 ab	175 b
4. N75P60K100 + Si	1,48 ab	5,8 a	6,30 b	0,108 ab	251 ab	165 ab
5. Komposto granulės (N 100)	1,46 ab	6,4 cd	5,71 ab	0,114 b	246 ab	163 ab
6. Komposto granulės (N 100) + Se	1,45 ab	6,3 bcd	5,84 ab	0,109 ab	242 ab	146 ab
7. Komposto granulės (N 100) + Si	1,43 ab	6,2 bc	5,31 ab	0,113 ab	247 ab	167 ab
8. Komposto granulės (N 100) + N(45) trąšos	1,45 ab	5,9ab	5,46 ab	0,112 ab	254 ab	137 ab
9. Komposto granulės (N 100) + N(45) trąšos + Se	1,43 ab	6,1 bc	5,26 ab	0,110 ab	263 b	137 ab
10. Komposto granulės (N 100) + N(45) trąšos + Si	1,41 ab	5,9ab	5,68 ab	0,113 ab	241 ab	129 ab

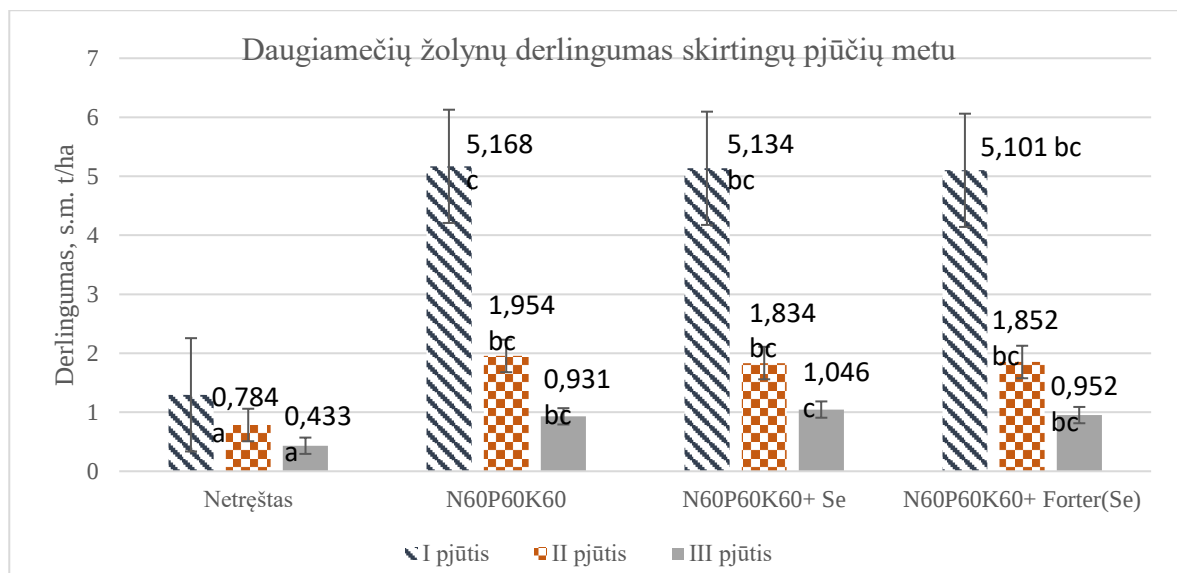
Pastaba. Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).

Apibendrinimas. Augalų, augintų mažo našumo dirvožemyje taikant skirtingas tręšimo technologijas, cheminės analizės parodė, kad nepriklausomai nuo naudotų trąšų, didžioji dalis azoto išnešama su grūdų derliumi. Fosforo sukaupimas tarp skirtingų augalų rūšių išsiskyrė – vasariniuose miežuose ir avižose tiek grūduose, tiek šiauduose sukaupiti panašūs kiekiai, bet su žieminių rugių šiaudų derliumi išnešamas didesnis fosforo kiekis nei su grūdų derliumi. Kalio išnešimu išsiskyrė sėjamosios avižos, kurios esmingai didesnis kiekis sukaupytas šiauduose nei grūduose. Vasarinių miežių ir žieminių rugių biomasėje sukaupytas kalio kiekis tarp šiaudų ir grūdų buvo santykinai vienodas. Silicio trąšų panaudojimas turėjo teigiamų tendencijų augalų produktyvumui, bet jo koncentracija augaluose tarp skirtingų variantų neturėjo esminių skirtumų. Seleno didesni kiekiai augalų biomasėje (grūduose, šiauduose) nustatyti variantuose, kuriuose papildomai panaudotos seleno skystos trąšos, o lyginant tarp skirtingų augalų rūšių – didesni kiekiai asimiliuoti vasariniuose javuose, nei žieminiuose rugiuose. Anglies asimiliacijos biomasėje rezultatai parodė, kad skirtingų augalų grūduose anglies koncentracija panaši. Vasarinių javų šiaudų biomasėje didesnė anglies koncentracija nustatyta netręštame (kontroliniame) variante, bet žieminių rugių šiaudų biomasėje anglies koncentracija nustatyta iki 19 % didesnė tręštuose variantuose.

2.2. Daugiamečių žolynų produktyvumas ir kokybiniai rodikliai

Daugiamečiai žolynai gali puikiai išnaudoti Lietuvos klimatinį sąlygų teikiamą vegetacijos sezoną – atnaujinti savo vegetaciją pavasarį ir kaupti biomasę iki vėlyvo rudens. Priklausomai nuo vegetacijos metu vyraujančių meteorologinių sąlygų, žolynai gali būti šienaujami nuo 1 iki 3 ar net 4 kartų.

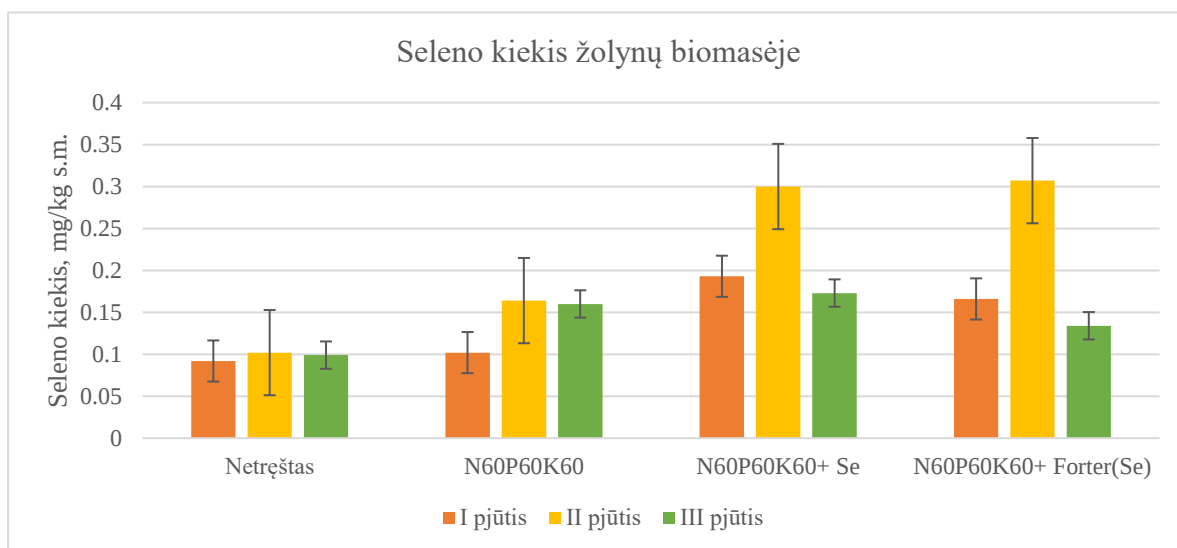
2020 m. pavasarinės vegetacijos metu, balandžio mėnesį, žolynams stigo drėgmės, o gausesni krituliai antroje gegužės pusėje turėjo nedidelės įtakos žolynų prieaugiui (žr. 39 paveikslą). Antrosios pjūties derlingumas būna mažesnis nei pirmosios, tad ir šiame eksperimente ši tendencija išliko. Trečiosios pjūties derlingumas būna mažesnis nei pirmųjų dviejų. Sąlyginai nedidelis azoto kiekis (N60) žolyne gan efektyviai padidina derlingumą, lyginant su visiškai netręštu žolynu. Skirtingų formų seleno panaudojimas neturėjo įtakos žolynų derlingumui nei vienos pjūties metu. Vertinant bendrą derlingumą, t.y. kiek žolynas gali sukaupti biomasės per vegetacijos sezoną, svarbų vaidmenį užima ne tik žolyno būklė, dirvožemis, tręšimas, bet ir meteorologinės sąlygos.



39 paveikslas. Žolynų derlingumas skirtingose pjūtyse.

Pastaba. Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).

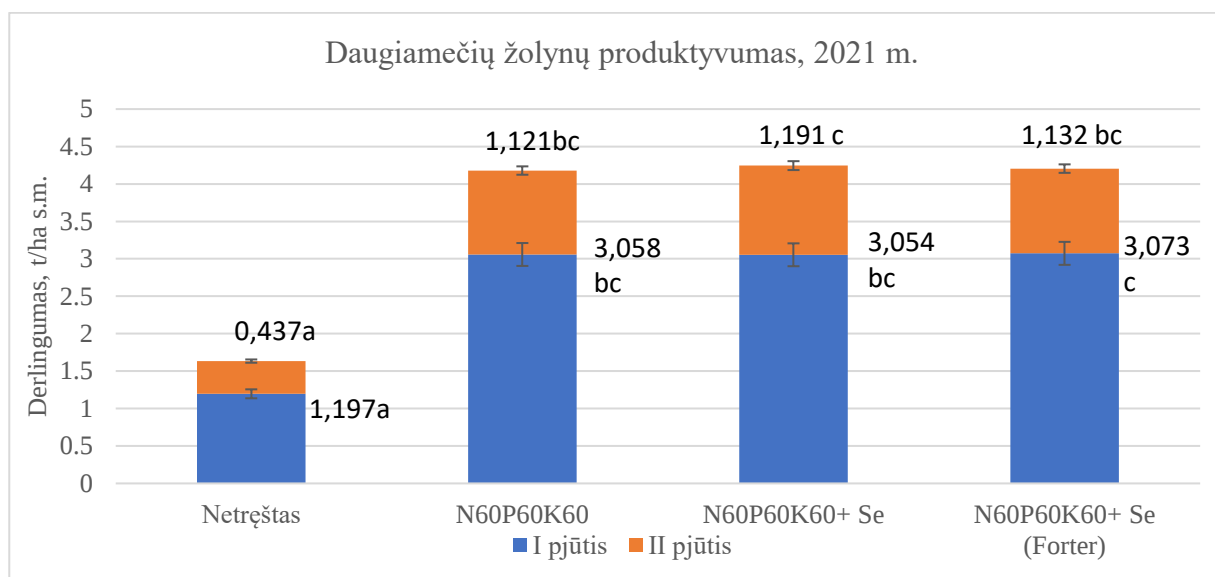
2020 m. seleno koncentracija žolynų biomasėje nustatyta po kiekvienos pjūties. Variantuose, kur netręšta arba tręšta tik mineralinėmis trąšomis, seleno rasta tik iki $0,15 \text{ mg kg}^{-1}$ sausos medžiagos (žr. 40 paveikslą). Variantuose, kuriuose papildomam tręšimui panaudoti seleno turintys produktai, seleno kiekis buvo didesnis. Išryškėjo tendencija, kad didesnis seleno kiekis buvo rastas II-osios pjūties biomasėje.



40 paveikslas. Seleno kiekis žolynuose skirtingų pjūčių metu 2020 m.

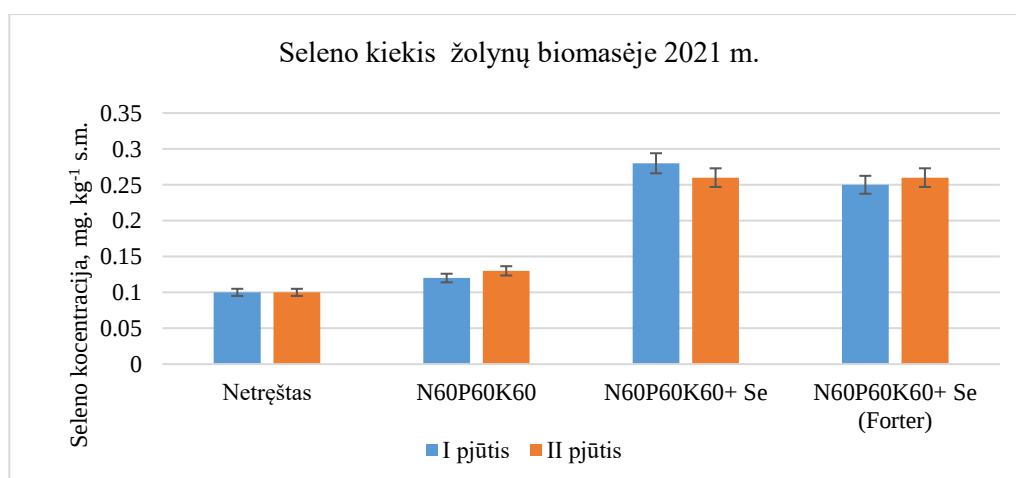
2020–2021 metų žiemos laikotarpis buvo permainingas ir didžiąja dalimi palankus daugiamečiams žolynams. Tačiau sausio mėnesį iškritęs gausus sniegas ant neišalusios žemės galėjo apsunkinti augalų žiemojimą. Permainingi pavasario orai, drėgmės stygius (nors ir mažesnis nei 2020 m.) neskatinė žolynų biomasės augimo. Gegužę iškritę gausūs krituliai naudingi žolynų

produktyvumo potencialui realizuoti, tačiau stigo šilumos ir pirmosios pjūties derlingumas buvo mažesnis nei 2020 m. (žr. 41 paveikslą). Birželio ir liepos mėnesiais vyravę karščiai ir sausros neigiamai veikė atolo augimą ir žolynai nesukauptė didelio kiekio biomasės. Todėl vietoj įprastų žolynams trijų pjūčių per vegetacijos sezoną, atliktos tik dvi pjūtys. 2021 metais bendras žolynų derlingumas kontroliniame variante buvo 1,5 karto, o tręštų žolynų 1,8 – 1,9 karto mažesnis nei 2020 m. Kaip ir 2020 m., taip ir 2021 m. produktyvumo rezultatai parodė, kad papildomas tręšimas selenu neturėjo esminės įtakos produktyvumui.



41 paveikslas. Žolynų atskirų pjūčių ir bendras biomasės derlingumas per vegetacijos sezoną. *Pastaba. Skirtingos raidės parodo esminius skirtumus tarp variantų ($p < 0,05$, Tukey's testas).*

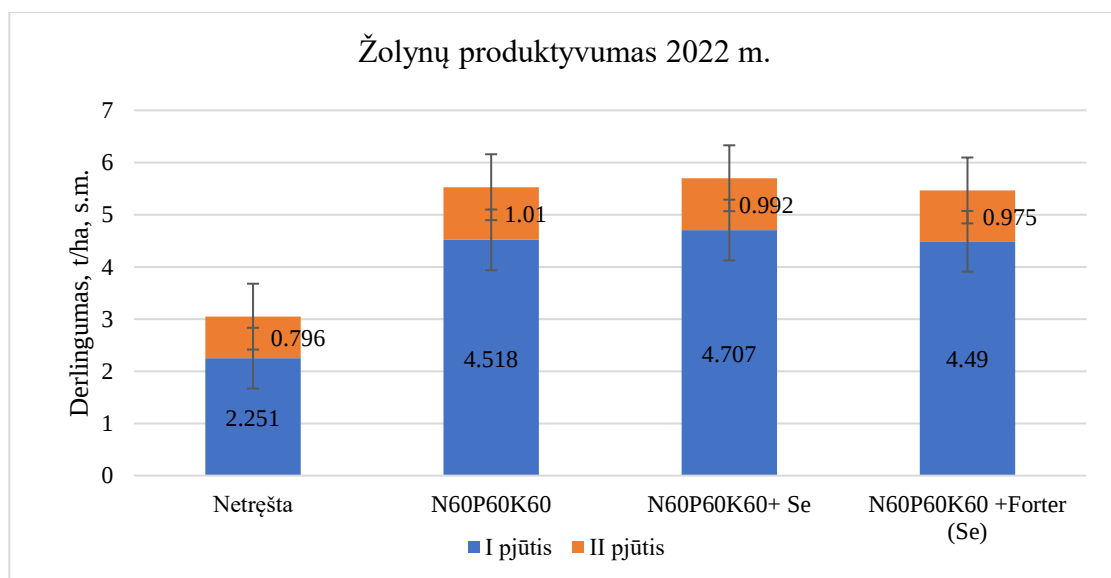
2021 m. atlikus seleno sukaupimo biomasėje matavimus, rezultatai parodė panašias tendencijas kaip ir 2020 m., kai seleno tręštuose variantuose biomasėje seleno kiekis buvo didesnis (žr. 42 paveikslą).



42 paveikslas. Seleno kiekis žolynuose skirtingų pjūčių metu 2021 metais.

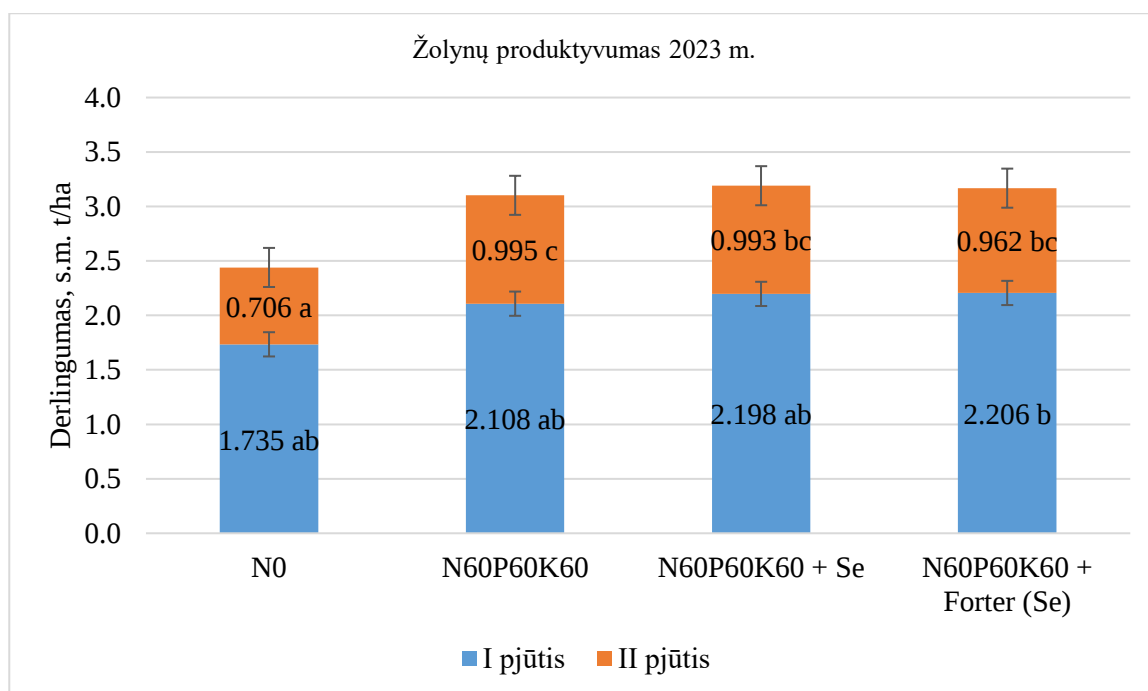
2022 m. pavasarį meteorologinės sąlygos buvo palankios daugiamečių žolynų produktyvumo potencialo realizavimui – balandžio ir gegužės mėnesiais nestigo drėgmės. I-osios pjūties metu (birželio I dešimtadienį) tręštų žolynų derlingumas siekė iki 4,7 t ha⁻¹(s. m.), kai tuo metu netręštų žolynų derlingumas buvo 2 kartus mažesnis (žr. 43 paveikslą). Liepos mėnesio II dešimtadienį žolynai šienauti antrą kartą, o derlingumas buvo esmingai mažesnis nei pirmosios pjūties metu. Seleno produktų panaudojimas žolynų produktyvumui esminės įtakos neturėjo.

Seleno kiekio analizės biomasėje pakartojo pirmaisiais ir antraisiais tyrimų metais gautas tendencijas, kuomet didesni šio elemento kiekiai rasti variantuose, kuriuose žolynai buvo per lapus papildomai tręšti seleno turinčiais produktais. Tiek visiškai netręštame, tiek vien mineralinėmis trąšomis patręštame žolyne seleno koncentracija biomasėje variavo nuo 0,081 mg kg⁻¹ iki 0,1 mg kg⁻¹, kai tuo metu papildomai selenu patręštuose žolynuose šis kiekis siekė nuo 0,27 mg kg⁻¹ iki 0,29 mg kg⁻¹ pirmos pjūties derliuje, ir nuo 0,28 iki 0,3 mg kg⁻¹ II-osios pjūties biomasėje.



43 paveikslas. Daugiamečių žolynų produktyvumas 2022 metais.

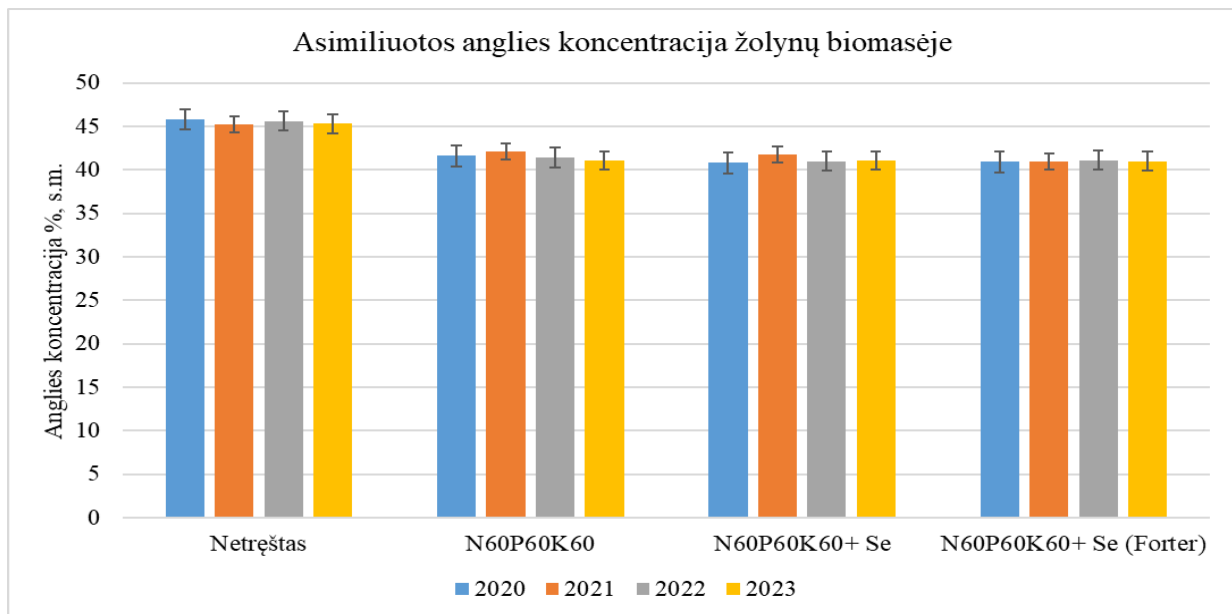
2023 m. balandžio mėnesį prasidėjusi sausra paveikė žolynų produktyvumą – pirmosios pjūties metu birželio mėn. žolynų derlingumas siekė nuo 1,7 t/ha s.m. netręštame variante iki daugiau kaip 2,1 t/ha s.m. mineralinėmis trąšomis tręštuose žolynuose (žr. 44 paveikslą). Palyginus žolynų derlingumą su ankstesnių tyrimų metų rezultatais, matomas akivaizdus derlingumo sumažėjimas dėl drėgmės stygiaus. Atlikus statistinį vertinimą tarp variantų esminių skirtumų nerasta. Antrosios pjūties derlingumas buvo gerokai mažesnis nei pirmosios pjūties, bet tręštuose variantuose derlingumas buvo esmingai didesnis nei netręštame variante. Apibendriant bendrą žolynų derlingumą, esminių skirtumų tarp variantų nebuvo nustatyta.



44 paveikslas. Daugiametinių žolynų produktyvumas 2023 metais.

Seleno trąšų panaudojimas žolynų produktyvumui įtakos neturėjo, o cheminės analizės parodė, kad koncentracija biomasėje buvo panaši į ankstesnių metų rezultatus. Seleno trąšomis netręštuose variantuose šio elemento rasta nuo 0,09 iki 0,1 mg kg⁻¹, o tręštuose skirtingomis seleno trąšomis šis kiekis buvo didesnis – 0,28–0,32 mg kg⁻¹, bet skirtumai tarp skirtingų seleno trąšų neesminiai.

Atliktos biomasės cheminės analizės parodė, kad sukauptos anglies dalis biomasėje didesnė netręštame žolyne (žr. 45 paveikslą). Mineralinėmis trąšomis tręštų žolynų biomasėje asimiliuotos anglies procentas mažesnis nei netręštame, tačiau atsižvelgiant į tai, kad, tręšiant žolynus, sukaupiama didesnė biomasė ploto vienetu, o su didesniu biomasės kiekiu fotosintezės metu asimiliuojamas didesnis anglies kiekis. Perskaičiavus asimiliuotos anglies kiekius žolynuose gauta, kad netręštame žolyne potencialus sukauptos anglies kiekis kito nuo 0,738 t ha⁻¹ 2021 m. iki 1,35 t ha⁻¹ 2022 m. Mineralinėmis trąšomis tręštuose žolynuose anglies biomasėje sukaupta nuo 1,27 iki 1,31 t ha⁻¹ 2023 m., nuo 1,71 t ha⁻¹ iki 1,75 t ha⁻¹ 2021 m., nuo 2,25 t ha⁻¹ iki 2,39 t ha⁻¹ 2022 m. ir nuo 3,19 t ha⁻¹ iki 3,35 t ha⁻¹ 2020 m.. Seleno turinčių trąšų panaudojimas esmingesnės įtakos neturėjo, nes dažnai žolynų produktyvumas priklauso nuo pasirinktos agrotechnikos (tręšimo) ir meteorologinių sąlygų, kurios yra vienas iš svarbiausių produktyvumo potencialo realizavimo faktorių.

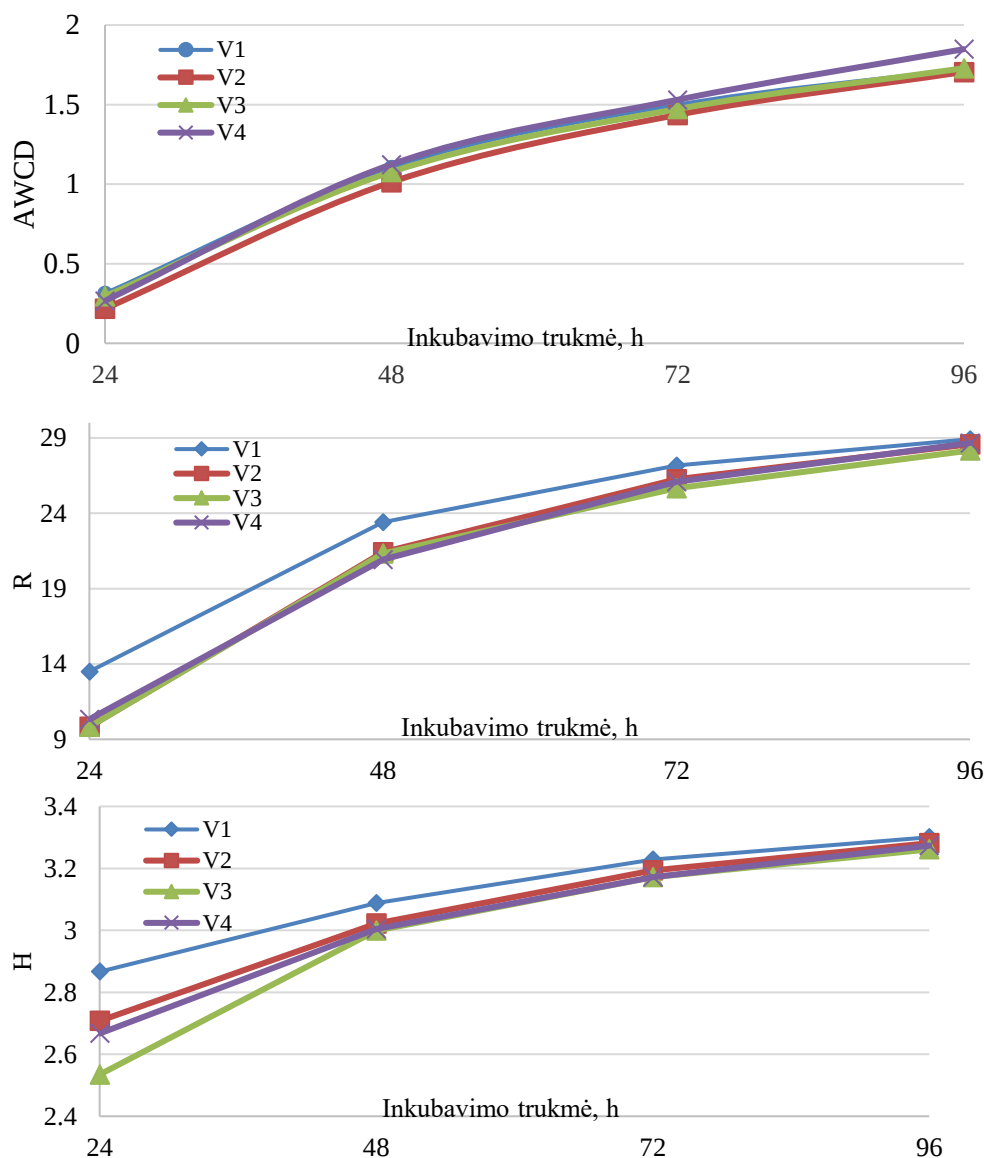


45 paveikslas. Anglies koncentracija žolynuose 2020—2023 metais.

Apibendrinimas. Taikant vienodą žolynų tręšimo technologiją skirtingais tyrimo metais žolynų produktyvumo potencialo realizavimą limitavo kritulių kiekis vegetacijos metu. Asimiliuotos anglies koncentracija skirtingais metais žolynuose išlaikė panašias tendencijas – didesnę koncentraciją nustatyta netręštame variante (44–46%), kai tuo tarpu mineralinėmis trąšomis tręštuose žolynuose šis rodiklis siekė 41–42 %. Skirtingų seleno trąšų panaudojimas praturtino žolynų biomasę šiuo elementu, bet skirtumai tarp naudotų seleno trąšų statistiškai neesmingi, tad, norint praturtinti žolynus selenu, galima naudoti įvairias tokio tipo trąšas.

2.3. Dirvožemio mikroorganizmų aktyvumas

Mikroorganizmų funkcinės įvairovės vertinimui panaudotas Biolog ekoplokštelių (EcoPlate) dirvožemio mikroorganizmų ekobendrijų fiziologinio profiliavimo metodas CLPP. Mikroorganizmų gausumą, aktyvumą ir įvairovę atspindinčių rodiklių - AWCD, R ir H įvertinimui dirvožemio mėginiai paimti augalų vegetacijos pabaigoje (derliaus nuėmimo metu). Matavimai buvo atliekami kas 24 h, nes po 24 valandų inkubacijos jau matomi pirmieji pokyčiai, tačiau, kad anglies šaltinis būtų visiškai panaudotas ir mikroorganizmai pasiektų maksimalų augimą tam tikrame substrate, inkubuojama 96 h (žr. 46 paveikslą). Pirmais tyrimų metais (2020 m.) atliekant lauko eksperimentus mikroorganizmų funkcinės įvairovės vertinimas buvo atliktas keturiems dirvožemio variantams V1 - kontrolė, V2 - $N_{100}P_{80}K_{140}$, V3 - $N_{100}P_{80}K_{140}+Se$ ir V4 - $N_{100}P_{80}K_{140}+Si$.

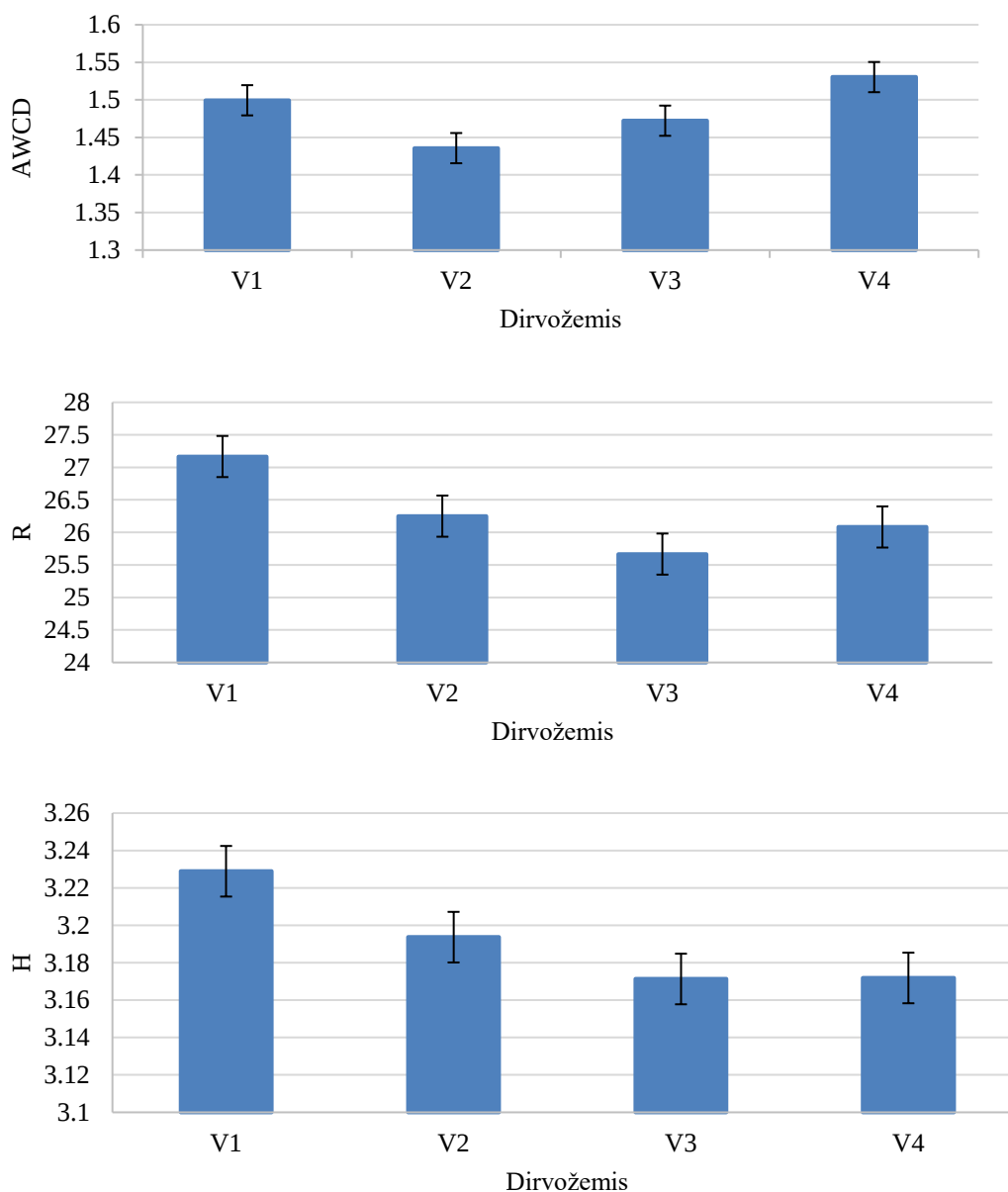


46 paveikslas. Dirvožemio mikroorganizmų gausumo (vidutinis substrato spalvos intensyvumas AWCD), gyvybingumo (R) ir fiziologinės mikroorganizmų įvairovės (Shannon įvairovės indeksas H) pokytis laike 96 h inkubavimo 25 °C temperatūroje (V1 - kontrolė, V2 - $N_{100}P_{80}K_{140}$, V3 - $N_{100}P_{80}K_{140}+Se$ ir V4 - $N_{100}P_{80}K_{140}+Si$)

Dirvožemio mikroorganizmų aktyvumo vertinimui pasirinkti 72 h matavimo duomenys, nes gautas mažiausias AWCD išsibarstymas, ir gauti rezultatai rodo, jog didžiausia mikroorganizmų gausa pasižymi V1 (kontrolinis variantas) ir V4 (mineralinės trąšos ir papildomai siliciu tręštas) dirvožemiai. Mikroorganizmų gyvybingumas ir įvairovė didžiausi V1 variante (kontroliniame) (žr. 47 paveikslą).

Galima daryti prielaidą, kad kontroliniame variante, nenaudojant jokių priemonių, vyksta natūralūs mikroorganizmų veiklos procesai, kai tuo tarpu panaudojus mineralines trąšas, gali būti prislopinama dirvožemio mikroorganizmų veikla. Žinoma, kad mineralinės trąšos gali keisti dirvožemio agrocheminius rodiklius, o net ir nedideli pokyčiai dirvožemio agrocheminėse savybėse, gali lemti ne

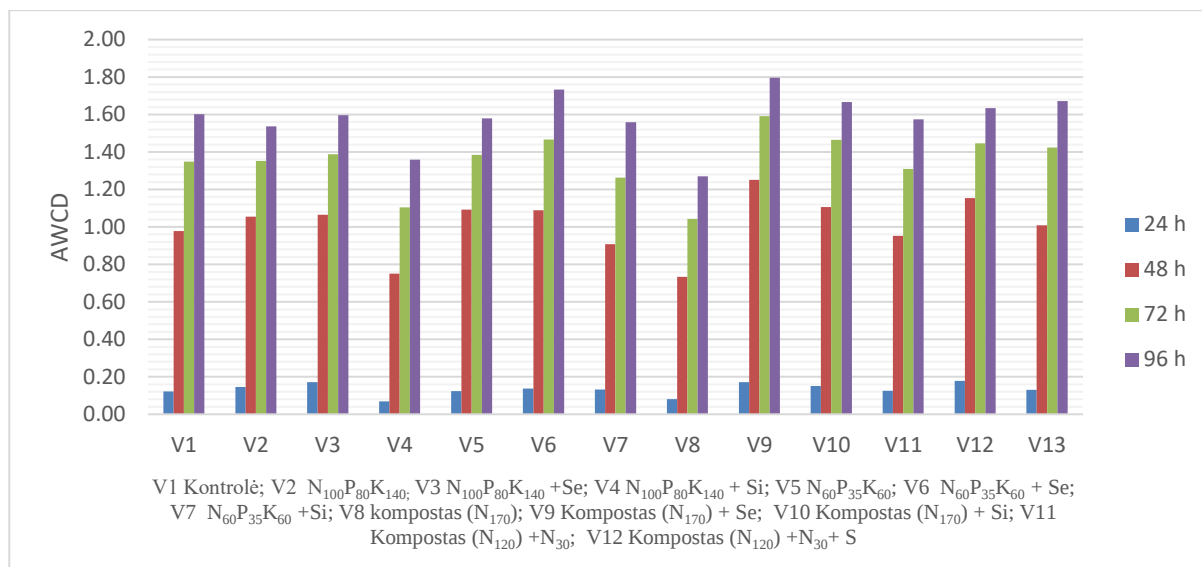
tik augalų produktyvumo potencialo išnaudojimo pokyčius, bet taip pat pakoreguoti mikroorganizmų gausą ir jų veiklą.



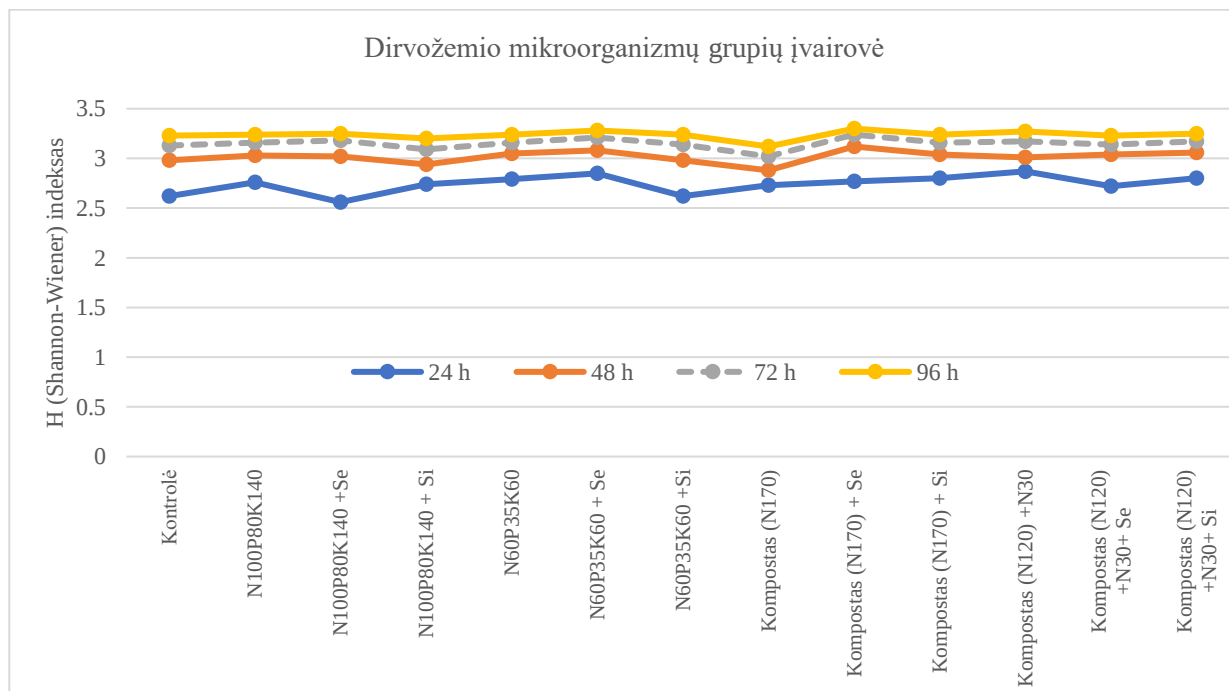
47 paveikslas. Mikroorganizmų funkcinės įvairovės skirtumai dirvožemyje, įvertinti po 72 h inkubavimo Biolog ekoplokštelėse (EcoPlate™), pagal metabolizuotų anglies šaltinių rodiklius: vidutinį substrato spalvos intensyvumą (AWCD), gyvybingumą (R) ir Shannon įvairovės indeksą (H) (V1 - kontrolė, V2 - $N_{100}P_{80}K_{140}$, V3 - $N_{100}P_{80}K_{140}+Se$ ir V4 - $N_{100}P_{80}K_{140}+Si$)

Tiksliajame lauko eksperimente (2021 m.) panaudojus komposto granules ir jų derinius su mineralinėmis trąšomis, javų derliaus nuėmimo metu surinktuose dirvožemio pavyzdžiuose vertinant mikroorganizmų gausą ir jų aktyvumą, AWCD analizės rezultatai parodė, kad variantuose, kuriuose panaudotos komposto granulės, mikroorganizmų buvo gausiau (žr. 48 paveikslą). Vertinant šį rodiklį po 96 valandų, išryškėjo tendencija, kad gausiau mikroorganizmų buvo variantuose, kuriuose augalų papildomam tręšimui per lapus buvo panaudotas seleno turintis produktas. Išsiskyrė 8 variantas, kuriame tręšimui naudotas vien tik kompostas – mikroorganizmų aktyvumas buvo mažesnis. Tokia pat tendencija

gauta ir taikant H (Shannon-Wiener) indeksą įvertinti mikroorganizmų tipų (rūšių) skaičius bendruomenėje (žr. 49 paveikslą), kad panaudojus vien tik komposto granules mikroorganizmų įvairovė buvo mažesnė.



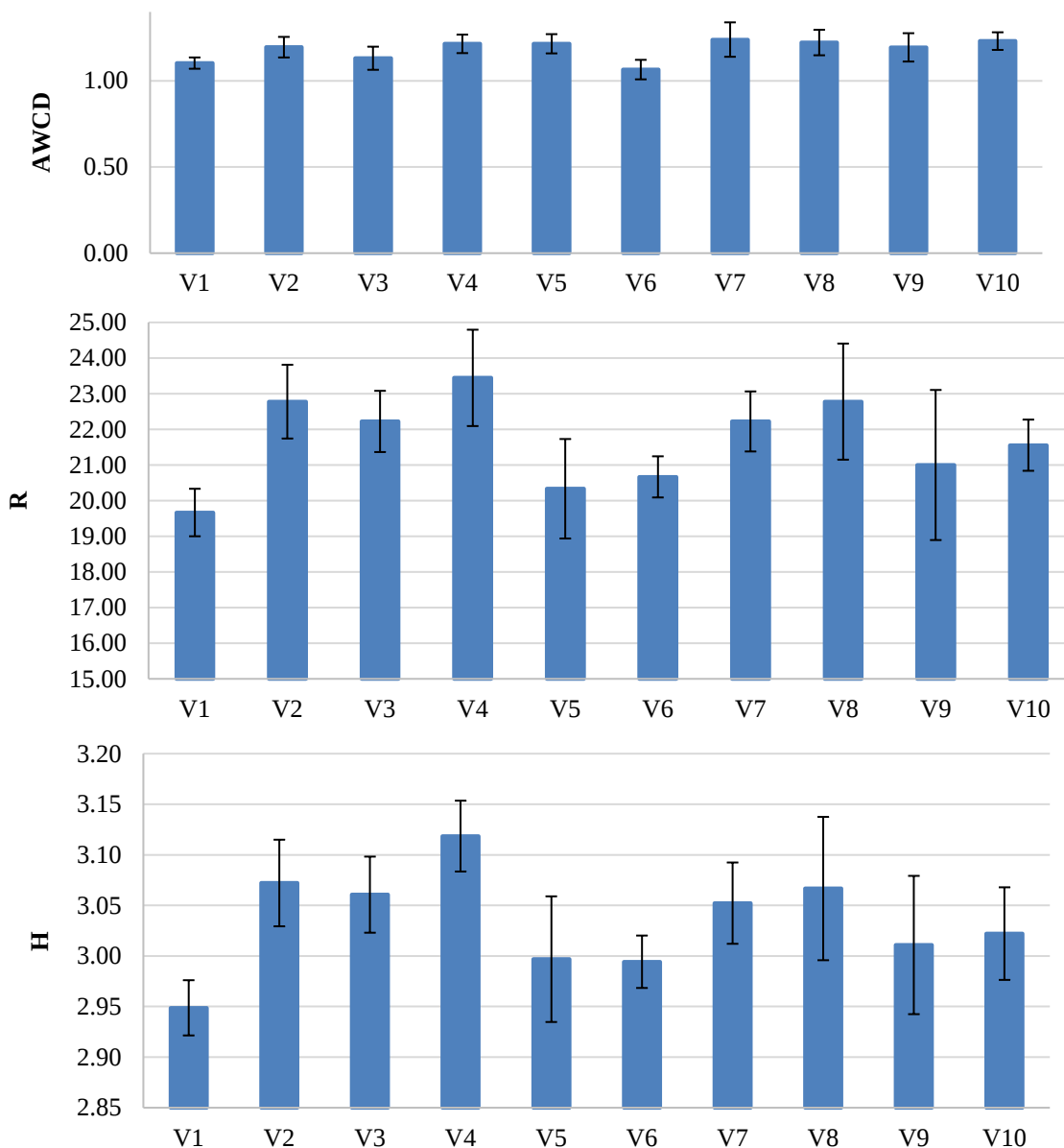
48 paveikslas. Mikroorganizmų, esančių dirvožemyje, gausumas, taikant AWCD analizės metodą (vidutinis šulinėlių spalvos intensyvumas).



49 paveikslas. Mikroorganizmų, esančių dirvožemyje įvairovė H (funkcinė medžiagų apykaitos įvairovė), vertinant CLPP analizės metodu.

Sėjamųjų avių lauko eksperimento dirvožemio tyrimuose mikroorganizmų funkcinės įvairovės skirtumai buvo vertinami visuose 10-yje eksperimento dirvožemio variantų. Atlikus dirvožemio analizę nustatyta, kad visi dirvožemio variantai pasižymėjo panašiu mikroorganizmų gausumu, tačiau išsiskyrė

6 variantas (Komposto granulės (N₁₀₀)+ Se), kuriame mikroorganizmų gausumas buvo mažiausias (žr. 50 paveikslą).



(V1 - Kontrolė; V2 - N75 P60 K100; V3 - N75 P60 K100 + Se; V4 - N75 P60 K100 +Si, V5 - Komposto granulės (N100); V6 - Komposto granulės (N100) + Se; V7 - Komposto granulės (N100)+Si; V8 - Komposto granulės (N100)+30 kg N mineralinių trąšų; V9 - Komposto granulės (N100)+30 kg N mineralinių trąšų + Se; V10 - Komposto granulės (N100)+30 kg N mineralinių trąšų +Si).

50 paveikslas. Mikroorganizmų funkcinės įvairovės skirtumai dirvožemyje, įvertinti po 72 h inkubavimo Biolog ekoplokštelėse (EcoPlate™), pagal metabolizuotų anglies šaltinių rodiklius: vidutinį substrato spalvos intensyvumą (AWCD), gyvybingumą (R) ir Shannon įvairovės indeksą (H)

Vertinant mikroorganizmų gyvybingumą (R) ir Shannon įvairovės indeksą (H), išsiskyrė 1 - dirvožemio variantas (Kontrolė), bei 5 (Komposto granulės (N₁₀₀)) ir 6 (Komposto granulės (N₁₀₀)+ Se) variantai – šie trys variantai pasižymėjo mažiausiu mikroorganizmų gyvybingumu ir įvairove, o didžiausiu mikroorganizmų gausumu, gyvybingumu ir įvairove sėjamųjų avižų lauko eksperimento tyrimuose, pasižymėjo 4 dirvožemio variantas (N₇₅ P₆₀ K₁₀₀ +Si).

IŠVADOS

Apibendrinus tiksliusius lauko eksperimentus mažo našumo dirvožemyje, gauti rezultatai leidžia daryti tokias išvadas:

- Mažo našumo dirvožemiuose auginant miglinius javus optimaliau pasirinkti sėjamasias avižas arba žieminius rugius. Šios augalų rūšys efektyviau realizavo savo produktyvumo potencialą nei vasariniai miežiai. Avižos ir žieminiai rugiai efektyviau įsisavino tiek mineralines trąšas, tiek organines ar organinių ir mineralinių trąšų kompleksą nei vasariniai miežiai. Siekiant optimalaus resursų naudojimo tikslinga javų tręšimą planuoti derinant organines su mineralinėmis trąšomis.

- Vertinant absorbuotų azoto, fosforo ir kalio kiekius miglinių javų biomasėje ir grūduose, didesni šių elementų kiekiai sukaupti avižų ir žieminių rugių augalų biomasėje. Planuojant tręšimo technologiją mažo našumo dirvožemyje, svarbu atsižvelgti į natūralias dirvožemio ir planuojamo auginti augalo savybes, efektyvesniam resursų naudojimui ir dirvožemio produktyvumo užtikrinimui.

- Lauko eksperimente augintų miglinių javų tręšimo technologiją papildžius seleno ir silicio produktais, gauta teigiama grūdų skaičiaus varpoje didėjimo tendencija. Selenas ir silicis, nepriklausomai nuo to, ar naudojami vien tik su mineralinėmis, ar derinant mineralines ir organines trąšas, leido vasariniams miežiams sukaupti didesnę biomasės kiekį, lyginant su variantais, kuriuose naudotos vien tik mineralinės trąšos. Avižų pasėlyje papildomai panaudojus Se ir Si turinčius produktus, esmingesnių produktyvumo skirtumų nenustatyta. Žieminių rugių pasėlyje silicio trąšos turėjo teigiamą tendenciją augalų produktyvumo potencialo realizavimui.

- Daugiamėčių žolynų produktyvumas lemiamas ne vien tik tręšimo, bet ir meteorologinių sąlygų vegetacijos metu. Derlingumas skirtingais metais siekė nuo 1,63 t ha⁻¹ iki 8,37 t ha⁻¹ s.m. Tręšimo technologiją papildžius seleno turinčiais produktais, žolynų derlingumo skirtumai tarp variantų buvo neesminiai, tačiau tai leido augalinėje produkcijoje esmingai padidinti seleno koncentraciją.

- Eksperimento laikotarpiu nustatyta, kad taikant įvairias tręšimo technologijas dirvožemio ariamajame sluoksnyje (0–30 cm) organinės anglies kiekis pakito 0,06 – 0,15% lyginant su nustatytu kiekiu eksperimento pradžioje. Naudoti tręšimo produktai turėjo teigiamą tendenciją dirvožemio pH rodiklio pokyčiams. Dirvožemio mikroorganizmų gausumo ir aktyvumo tyrimai, parodė, kad mikroorganizmų įvairovė ir gyvybingumas priklauso ne tik nuo tręšimo būdo, bet ir nuo auginamų pasėlių bei meteorologinių sąlygų.

- Vasarinių javų vegetacijos metu, panaudojus bepilotę skraidyklę (dronu) surinktą informaciją, buvo skaičiuoti 4 skirtingi augalų vegetatyviniai indeksai, kurie vėliau palyginti su faktiniu grūdų derliumi. Koreliacinės-regresinės analizės rezultatai parodė, kad stipriausia priklausomybė (R^2) tarp grūdų derliaus ir vegetatyvinių indeksų gauta intensyvaus stiebo augimo metu (BBCH32), o vėlesniais augimo tarpsniais R^2 reikšmės nuosekliai mažėjo.

Literatūros sąrašas

1. Alsaedi et al., 2019. Silica nanoparticles boost growth and productivity of cucumber under water deficit and salinity stresses by balancing nutrients uptake. *Plant Physiology and Biochemistry*. Vol. 139, June, Pages 1-10
2. Aplinkos apsaugos agentūra. <http://atliekos.gamta.lt/cms/index?rubricId=01f545a1-ebed-4f2d-b05a-2b1bf5e7494b>
3. Artyszak A., Gozdowski D., Kucińska k., 2017. Impact of Foliar Fertilization on the Content of Silicon and Macronutrients in Sugar Beet. *Plants* 2019, 8(5), 136; <https://doi.org/10.3390/plants8050136>
4. Dhankher ir Foyer., 2018. Climate resilient crops for improving global food security and safety. Vol. 41, Is 5. Special Issue on Climate Resilient Crops. Pages 877-884.
5. Epstein E. The anomaly of silicon in plant biology. *PNAS* January 4, 1994 91 (1) 11-17; <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>
6. Eurostat. 2020. Crop production in EU standard humidity. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/APRO_CPSH1_custom_92742/default/table?lang=en
7. Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., Stark R., Rundquist D. 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80 (1): 76-87. [doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9)
8. Kosiorek, M., Wyszowski, M. Content of macronutrients in oat (*Avena sativa* L.) after remediation of soil polluted with cobalt. *Environ Monit Assess* 191, 389 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7529-6>
9. Kottke M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15(3):259–263. doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130
10. Louhaichi M., Borman M.M., Johnson D.E. 2001. Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat. *Geocarto International*, 16: 65-70.
11. Meier U. 2018. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants. Julius Kühn-Institut (JKI) Quedlinburg. <https://www.juliuskuehn.de/media/Veroeffentlichungen/bbch%20epaper%20en/page.pdf>
12. Mohr R M, C A Grant, W E May, and F C Stevenson, 2007. The influence of nitrogen, phosphorus and potash fertilizer application on oat yield and quality. *Canadian Journal of Soil Science*. August 2007, <https://doi.org/10.4141/CJSS06022>
13. Raymond Hunt Jr E., Daughtry C.S.T., Eitel J. U. H., Long D.S. Remote Sensing Leaf Chlorophyll Content Using a Visible Band Index. *Agronomy Journal*, 103 (4), 1090-1099. doi.org/10.2134/agronj2010.0395
14. Schröder P., B. Beckersb, S. Danielsb, C.Poschenriederg, F.Rineaub, B.Rutkowskah, T.Schmide, W.Szulch, N.Wittersb, A.Sæbøf. 2018. Intensify production, transform biomass to energy and novel goods and protect soils in Europe—A vision how to mobilize marginal lands. *Science of The Total Environment*. Vol. 616–617, March, P. 1101-1123
15. Stoffaneller ir Morse., 2015 A review of dietary selenium intake and selenium status in Europe and the Middle East. *Nutrients*. 2015 Feb 27;7(3):1494-537. doi: 10.3390/nu7031494.
16. Woebbecke D.M., Meyer G.E., Von Barga K., Mortensen D. 1995. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the ASAE*, 38: 259–269.

17. World reference base for soil resources 2014, update 2015. 2015. Reports 106. FAO, Rome.
18. Zhu ir Gong, 2014. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agron. Sustain. Dev.* (2014) 34:455–472

Projekto viešinimas

Pranešimas „Augalų produktyvumo potencialas ir tręšimas“ seminare „Tarpiniai pasėliai, jų auginimo technologijos ir nauda“, 2023 m. kovo mėn. 16 d., Akademija, Kėdainių r.

Tręšimo subtilybės augalų produktyvumo potencialui realizuoti. V. Povilaitis, R. Žydelis, E. Bakšienė Mano ūkis, 2023 m. 05; <https://manoukis.lt/mano-ukis-zurnalas/2023/05/tresimo-subtilybes-augalu-produktyvumo-potencialui-realizuoti/>

„Miglinių javų produktyvumo stabilumas ir kokybiniai rodikliai mažo našumo dirvožemiuose, derinant tręšimą mineralinėmis ir organinėmis trąšomis“, V. Povilaitis, R. Žydelis, E. Bakšienė, Š. Antanaitis ir R. Žvirdauskienė, 2023 m., Naujausios rekomendacijos žemės ir miškų ūkiui, 8 p.

Seminaras „Įvairios agropriemonės augalų produktyvumo stabilumui mažo našumo dirvožemiuose“ parodoje „Agrovizija 2022“ 2022 metų birželio 30 d.

Stendinis pranešimas tarptautiniame simpoziume: „5th International Symposium of Soil Physics“, Lietuva, Akademija, Kėdainių r. 2022 m. birželio 2–3 d. (nuoroda į pranešimų leidinį: <http://ebooks.vdu.lt/eb/3080/5th-international-symposium-of-soil-physics-book-of-abstracts/>).

Pranešimas „Biologiškai tvarios ir klimatui palankios augalinės produkcijos maistui ir pašarams auginimas mažo našumo dirvožemiuose“ LR Žemės ūkio ministerijos organizuotame seminare „Žemės ūkio ministerijos finansuojamų tarptautinių mokslo projektų įgyvendinimo pristatymas“, 2022 m. birželio 2 d., Vilnius.

Internetinis projekto puslapis: <http://www.biofoodonmars.com/en>

Paskelbtos mokslinės publikacijos:

Peter Schröder, Michel Mench, Virmantas Povilaitis, Francois Rineau, Beata Rutkowska, Michael Schlöter, Wiesław Szulc, Renaldas Žydelis, Evelin Loit, „Relaunch cropping on marginal soils by incorporating amendments and beneficial trace elements in an interdisciplinary approach“, *Science of The Total Environment*, Volume 803, 2022, 149844, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149844>

Suplanuotos publikacijos

Rineau, F., Groh, J., Claes, J., Mench, M., Moreno-Druet, M., Povilaitis, V., Puetz, T., Rutkowska, B., Schroeder, P., Soudzilovskaia, N., Szulc, W., Thijs, S., Vandenberg, J., Vereecken, H., Verhaege, K., Zydelis, R., Loit, E. Limited effects of crop foliar Si fertilization on a marginal soil under a future climate scenario. (Iteikta spaudai).

Szulc, W., Rineau, F., Mench, M., Schröder, P., Povilaitis, V., Szulc, W., Rutkowska, B., Tiideberg, K., Žydelis, R., Loit, E. Foliar Silicon fertilization can increase carbon sequestration via phytoliths. (Iteikta spaudai).

Povilaitis V., Žydelis R., Bakšienė E., Antanaitis Š., ir kt. Effectiveness of foliar Si and Se fertilisers in cereal crops rotation on marginal soil (ruošama)

Povilaitis V., Žvirdauskienė R., Bakšienė E., Žydelis R., Antanaitis Š., ir kt. Soil amendments effectiveness on microorganisms on marginal soil (ruošama).

Viešinimas moksliniuose renginiuose:

Mench M, Loit E, Keres I, Povilaitis V, Rineau F, Rutkowska B, Schröder P, Tiideberg K, Szulc W, Zydelis R, Segura R. Biofortified and climate-resilient food and fodder production on marginal and contaminated soils. 1st Join International Conference ICOBTE/ICHMET Clean Environment, Human Health. Our future. Sept. 6 – 10, 2023, Wuppertal, Germany, 2023.

Žydelis R, Weihermüller L, Herbst M, Loit E, Szulc W, Schröder P, Povilaitis V, Mench M, Segura R, Rineau F, Rutkowska B. Potential yield of barley cultivation on marginal soils as affected by abiotic stress under various European climate conditions. 4th Agriculture and Climate change conference, May 7-9, 2023, Dresden, Germany, 2023

Loit, E., Keres I., Mench M., Povilaitis V., Rineau F., Rutkowska B., Schröder P., Tiideberg K., Szulc W., Zydelis R. Biofortified and climate-resilient food and fodder production on marginal soils. European Society for Agronomy biannual congress, 1.09.2022, Potsdam, Germany. 2022.

Mench M, Loit E, Keres I, Povilaitis V, Rineau F, Rutkowska B, Schröder P, Tiideberg K, Szulc W, Zydelis R. Biofortified and climate-resilient food and fodder production on marginal and contaminated soils. 8th European Bioremediation Conference, Kalogerakis N, Fava F (Eds.), June 12-17, 2022, Chania, Crete, Greece. p. 255, 2022.

Szulc, W., Loit, E., Rutkowska, B., Mench, M., Povilaitis, V., Rineau, F., Schröder, P., Szyszkowska, K., Zydelis R. Biofortified and climate-resilient food and fodder production on marginal soils. Frontiers in experimental research on changing environments. 7 June 2022 - 9 June 2022, Germany.

Loit E, Mench M, Povilaitis V, Rineau F, Rutkowska B, Schröder P, Tiideberg K, Szulc W, Zydelis R. BIOFOODONMARS: Biofortified and climate-resilient food and fodder production on marginal soils. Facce surplus workshop, 28-29.09, 2021, Jülich, Germany,

Povilaitis V., Žydelis R., Bakšienė E., Schröder P., Rineau F., Antanaitis Š., Loit E., Szulc W., Mench M., Žvirdauskienė R. „Biofortified and climate resilient food and fodder production on marginal soils“, international online conference “TOWARDS ZERO POLLUTION – CHALLENGES AND PROSPECTS FOR AGRICULTURE AND FORESTRY”, 2021 m. gegužės 27 d.

Loit, E., Mench M., Povilaitis V., Rineau F., Rutkowska B., Schröder P., Szulc W., Zydelis R. Biofortified and climate-resilient food and fodder production on marginal soils, European Society for Agronomy, 1-4.09.2020, Sevilla, Spain.

FACCE SURPLUS event 28-29 September 2021 :Status Seminar, Valorisation Workshop, HEU Info Event (online). Biofortified and climate-resilient food and fodder production on marginal soils.

„Biofortified and climate-resilient food and fodder production on marginal soils“, autoriai: E. Loit, M. Mench, V. Povilaitis, F. Rineau, B. Rutkowska, P. Shroder, W. Szulc, R. Žydelis. 16-asis Europos agronomų organizacijos kongresas (ESA) Rugsėjo 1-4 d., 2020 m.

SUDERINTA:

(Tyrimų priežiūros komisijos pirmininkas)

(Vardas, Pavardė)

(Data)

Priedai

Miglinių javų produktyvumo stabilumas ir kokybiniai rodikliai mažo našumo dirvožemiuose, derinant tręšimą mineralinėmis ir organinėmis trąšomis



▲ Skirtingų tręšimo technologijų efektyvumas vasarinių miglinių javų pasėlyje

LAMMC ŽI: Virmantas Povilaitis, Renaldas Žydelis, Eugenija Bakšienė, Šarūnas Antanaitis ir Renata Žvirdauskienė

Smėlžemiuose ir kituose mažo našumo dirvožemiuose, siekiant išlaikyti auginamų augalų produktyvumą, jo kokybinius rodiklius ir dirvožemio stabilumą, svarbus subalansuotas tręšimas mineralinėmis ir organinėmis trąšomis.

Mažo našumo dirvožemiuose (smėlžemiuose) augalų produktyvumo potencialo realizavimą lemia pasirinktos augalų rūšys ir veislės, natūralios dirvožemio savybės, meteorologinės sąlygos, auginimo agrotechnika,

ypač subalansuotas tręšimas organinėmis bei mineralinėmis trąšomis, ir papildomas tręšimas per lapus. Pasirinkta tręšimo technologija lemia dirvožemio mikroorganizmų gausumą ir aktyvumą – geresni rodikliai buvo variantuose, kuriuose naudotos organinės trąšos arba jų kompleksas su mineralinėmis trąšomis.

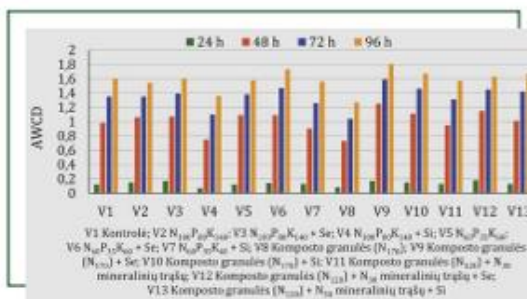
Smėlžemiuose pranašesnės buvo sėjamosios avižos nei vasariniai miežiai – avižos efektyviau išnaudojo savo produktyvumo potencialą nei vasariniai miežiai. Taikant kompleksinį tręšimą organinėmis (komposto granulėmis) ir mineralinėmis trąšomis galima pasiekti panašų augalų produktyvumą, kaip ir tręšiant vien tik mineralinėmis trąšomis. Avižos efektyviau įsisavino ir mineralines trąšas, ir organines arba organinių ir mineralinių trąšų kompleksą nei vasariniai miežiai. Vertinant absorbuotus azoto, fosforo ir kalio kiekius miglinių javų biomasėje ir grūduose, didesni šių elementų kiekiai buvo sukaupti avižų augalų biomasėje. Augalai mažiausiai įsisavino fosforo, avižos žymiai daugiau įsisavino kalio nei vasariniai miežiai, todėl, planuojant tręšimo technologiją mažo našumo dirvožemyje, svarbu atsižvelgti į natūralias jo ir planuojamų auginti augalų savybes, siekiant efektyviau išnaudoti resursus.

Miglinių javų vegetacijos metu, panaudojus bepilote skraidykle (dronu) gautą informaciją, apskaičiuoti 4 skirtingi augalų vegetatyviniai indeksai, kurie vėliau palyginti su faktiniu grūdų derliumi. Koreliacinės-regresinės analizės rezultatai parodė, kad stipriausia priklausomybė (R^2) tarp grūdų derliaus ir vegetatyvinių indeksų gauta intensyvaus stiebo augimo metu (BBCH 32), o vėlesniais augimo tarpsniais R^2 reikšmės nuosekliai mažėjo.

Lauko eksperimente augintų miglinių javų tręšimo technologiją papildžius seleno ir silicio produktais, gauta teigiama grūdų skaičiaus varpoje didėjimo tendencija. Selenas ir silicis, nepriklausomai nuo to, ar naudoti vien tik su mineralinėmis, ar derinant mineralines ir organines trąšas, leido vasariniams miežiams sukaupti didesnį kiekį biomasės, lyginant su variantais, kuriuose tręšta vien tik mineralinėmis trąšomis. Avižų pasėlyje papildomai panaudojus seleno ir silicio turinčius produktus, esmingesnių biomasės skirtumų nenustatyta – esmingesnis veiksnys buvo tręšimas mineralinėmis trąšomis. Vasarinius miežius ir avižas papildomai patręšus skystomis seleno trąšomis, vegetacijos metu gautos nuo 2,1 iki 3 kartų reikšmingai didesnės seleno koncentracijos grūduose ir šiauduose, lyginant su variantais, kuriuose seleno trąšos nenaudotos.

Rekomendacija. Vasarinius javus auginant mažesnio derlingumo dirvožemiuose ir siekiant efektyvesnio augalų produktyvumo potencialo realizavimo, rekomenduojama tręšti organinėmis trąšomis ir papildomai įterpti mineralinių azoto trąšų, o siekiant augalinę produkciją papildyti selenu, panaudoti skystas seleno trąšas.

▶ Dirvožemio mikroorganizmų gausumas, skirtingose tręšimo technologijose taikant AWCD (Average Well Colour Development) analizės metodą



AUGALININKYSTĖ

Tręšimo subtilybės augalų produktyvumo potencialui realizuoti

Skirtingų rūšių augalams reikia nevienodo maisto medžiagų kiekio, kurį augalai gauna iš mineralinių ir organinių trąšų. Derinant tręšimą jomis galima geriau išnaudoti augalų ir dirvožemio potencialą jo nenualinant.

Augalų produktyvumą lemia daugelis veiksnių, tokie kaip: augalo rūšies ir jo veislės savybės, dirvožemio cheminės ir fizikinės savybės, pasirinkta auginimo technologija, meteorologinės sąlygos. Augalams, kaip ir kiekvienam gyvam organizmui, gyvybei palaikyti ir produkcijai išauginti reikia įvairių maisto medžiagų.

40 ▶

Maisto medžiagos skirstomos į makroelementus: azotas (N), fosforas (P), kalis (K), kalcis (Ca), siera (S), magnis (Mg), kurių augalams reikia iš dalies daugiau. O mikroelementų, tokių kaip: boras (B), varis (Cu), manganas (Mn), cinkas (Zn), molibdenas (Mo), kobaltas (Co), geležis (Fe), jodas (I), selenas (Se) ir kt., augalai naudoja labai mažai, bet jie svarbūs augimui, vystymuisi ir produktyvumo potencialui realizuoti. Taigi, visi makro- ar mikroelementai yra reikalingi augalų augimo ir vystymosi cikle ir kitas elementas jo pakeisti negali, o maisto elementų prieinamumą dirvožemyje augalams nulemia dirvožemio pH rodiklis.



Skirtingų tręšimo technologijų efektyvumo vasarinių miglinių javų pasėlyje bandymas, įrengtas LAMMC ŽI Vokės filiale

AUGALININKYSTĖ

38 ▶

Kiek maisto medžiagų reikia augalams

Pagrindinių makroelementų – azoto (N), fosforo (P), kalio (K) reikia visiems augalams, tik skiriasi konkrečios rūšies poreikiai. Sudarant tręšimo planą, dažniausiai skaičiuojama, kiek kilogramų elemento veikliosios medžiagos reikės norint užauginti 1 toną produkcijos, kitaip tariant, kiek augalas gali pasisavinti maisto medžiagų. Skaičiuojant reikia atsižvelgti ir į dirvožemio turtingumą maisto medžiagų, buvusį priešėlį, ar tręšta organinėmis trąšomis. Skirtingiems augalams reikia nevienodai įvairių makroelementų (žr. lentelę).

Žiemkenčių tręšimo tikslai

Pavasari pirmiausia skubama tręšti peržiemojusius žieminius javus ir rapsus, vėliau ateina eilė ir vasarinių augalų tręšimui prieš sėją ar, naudojantis šiuolaikinėmis technologijomis, taupant laiką ir išteklius, tręsimui per sėją. Skaičiuojama, kad apie 30 proc. azoto pasėliai gauna iš dirvos, o 70 proc. – iš mineralinių trąšų.

Žieminiai augalai tręšiami atsinaujinus jų vegetacijai, dažnai taikant dviejų ar trijų kartų tręsimą – atsižvelgiant į pasirinktą ūkio strategiją ir pasėlio būklę. Efektyvi žieminių kviečių mityba azotu pavasarį krūmijimosi tarpsniu didina susiformavusių ūglių, bamlėjimo tarpsniu – produktyvių stiebų skaičių, grūdų formavimosi tarpsniu – grūdų kokybę. Teigiama, kad žieminiai kviečiai iki bamlėjimo pradžios sunaudoja apie 40 proc. viso jiems reikalingo azoto.

Žieminiai rapsai pavasarį patręšiami 2–3 kartus, tik svarbu nepamiršti, kad jie reiklūs sierai, tad azoto trąšose turėtų būti ir pakankamai sieros. Siekiant efektyviai realizuoti rapsų produktyvumo potencialą, svarbu panaudoti ir boro turinčias skystas trąšas.

Kiek trąšų reikia vasarajui

Vasariniai jai: avižos, miežiai, kviečiai ir kvietrugiai tręšiami prieš sėją arba trąšos įterpiamos per sėją. Avižos ir miežiai geriau geba pasiimti maisto medžiagas iš dirvožemio nei vasariniai kviečiai, tad juos tręšti mineralinėmis trąšomis reikia mažiau nei pastaruosius. Pagal planuojamą potencialų derlingumą apskaičiuotas trąšų kiekis gali būti pasėliui išbertas per vieną ar per du kartus. Vasariniai kviečiai gali būti pamaitinti per 2–3 kartus: NPK prieš sėją (azoto bent 50 proc. suplanuotos normos) ir vėles-

Dažniausiai rekomenduojamas maisto medžiagų poreikis 1 tonai produkcijos išauginti (įskaitant šalutinę produkciją – šiaudus, lapus), kg

Augalų rūšis	Azotas (N)	Fosforas (P ₂ O ₅)	Kalis (K ₂ O)
Avižos	22–25	10–12	21–25
Vasariniai miežiai	21–25	10–11	17–20
Vasariniai kviečiai	21–25	7–11	17–20
Vasariniai kvietrugiai	19–22	10–11	22–24
Žieminiai kviečiai	22–25	10–12	17–20
Žieminiai rapsai	40–45	20–25	40–55
Žieminiai rugiai	21	10–11	24–25
Žirniai	4,5	10–14	20–30
Pupos	5,0	15–17	22–30
Dauglmetės miglinės žolės (žaliųjų masė)	3–4	1–1,6	3,8–6,5

Šaltinis – „Aplinkosauga ir tręšimo planavimas“, 2009; Vieningos tręšimo planų sudarymo metodikos parengimas, 2021

niuose augimo tarpsniuose (krūmijimosi, bamlėjimo).

Pupiniams (ankštiniais) augalams: žirniams, pupoms azoto trąšų reikia tik pradinuose augimo etapuose. Rekomenduojama prieš sėją žirnius patręšti 30–45 kg ha⁻¹ N veikliosios medžiagos, o fosforo ir kalio – pagal lentelėje pateiktus rodiklius ir planuojamą pasiekti derlingumą.

Pupos, kaip ir žirniai, dėl gumbelinių bakterijų geba apsirūpinti azotu iš atmosferos, tad panaši kaip ir žirnių azoto trąšų norma gali būti išberta prieš sėją. Pupoms fosforo ir kalio reikia šiek tiek daugiau.

Tam, kad susiformuotų gumbelinės bakterijos pupinių augalų šaknyse, reikia molibdeno (Mo). Jo dažniausiai trūksta rūgščiuose ir lengvos granulimetrinės sudėties dirvožemiuose.

Organinių trąšų nauda augalams ir dirvožemiui

Be mineralinių trąšų, svarbios ir organinės trąšos. Nuo seno žinoma organinių trąšų – mėšlo (skysto ir kraikinio) – nauda dirvožemio savybėms ir augalų produktyvumui.

Keičiantis technologijoms, šių dienų rinkoje galima rasti įvairiausių skirtingos kilmės organinių produktų, skirtų augalams tręšti. Tai granuliuotas mėšlas, per biodujų gamybą susidarantys biosubstratai (skystas ir separuotas), įvairūs kompostai (žaliųjų atliekų, perdirbtų produktų ir t. t.).

Pirmaisiais metais augalai gali pasisavinti iki 25 proc. organinėse trąšose esančių elementų. Be to, organinės medžiagos pagerina dirvožemį: pagerėja jo

struktūra, lengvose dirvose geriau sulaukiama drėgmės.

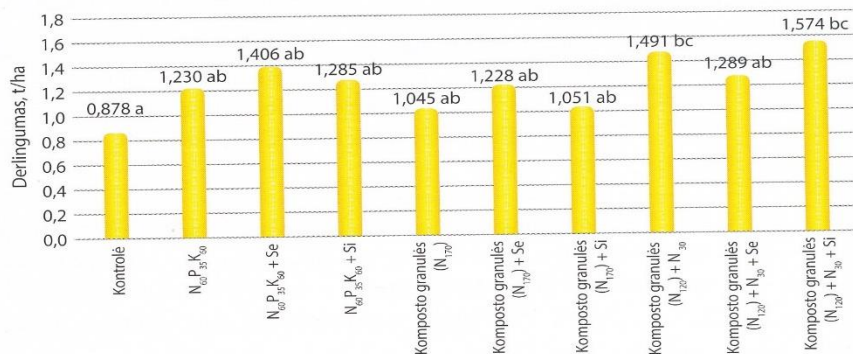
Bandymai derinant mineralines ir organines trąšas

Naudojant organines ir papildomas tręšiant mineralinėmis trąšomis, galime pagerinti augalų mitybos sąlygas, sumažinti mineralinių trąšų poreikį ir išlaikyti stabilų derlingumą. Tą parodė Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centro Žemdirbystės instituto (LAMMC ŽI) Vokės filiale atliktų tikslinių lauko eksperimentų rezultatai lengvos granulimetrinės sudėties dirvožemyje auginant vasarinius miežius (2021 m.) ir avižas (2022 m.).

Bandymuose tręsimui buvo naudojamos įprastos NPK mineralinės, organinės trąšos (komposto granulės) ir įvairūs jų deriniai. Kompostas buvo pagamintas iš panaudoto grybų auginimo substrato, medžio pjuvenų, kraikinio mėšlo ir augalinių atliekų. Papildomam tręsimui per lapus buvo panaudotos seleno („Forter“) ir silicio („Optysil“) turinčios skystosios trąšos. Organinės ir mineralinės trąšos buvo išbertos prieš vasarinių javų sėją.

Eksperimentuose buvo skirtingi variantai – panaudotos tik mineralinės trąšos, tik organinės trąšos, ir variantai, kai tręšta organinėmis trąšomis ir papildomai – mineralinėmis azoto trąšomis. Skystos trąšos naudotos papildomam tręsimui per lapus, 0,5 l/ha norma. Seleno trąšos naudotos du kartus per vegetaciją – krūmijimosi ir bamlėjimo tarpsniais, o silicio trąšomis augalai purkšti tris kartus per vegetaciją – krūmijimosi, bamlėjimo tarpsniais ir prieš žydėjimą.

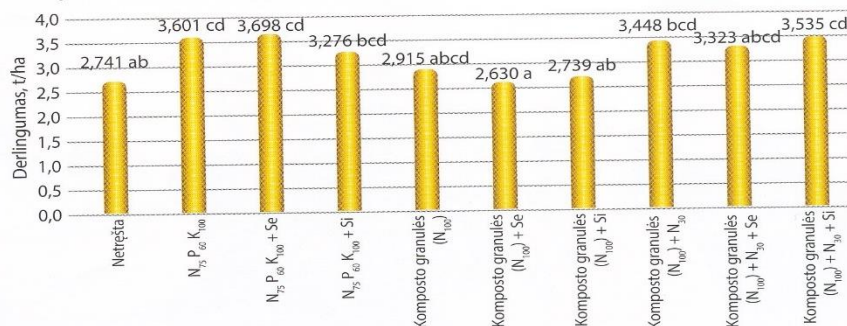
Vasarinių miežių derlingumas lengvame smėlžemyje, taikant skirtingas tręšimo technologijas, 2021 m.



Pastaba – skirtingomis raidėmis (a, b, c,) pažymėtų stulpelių skirtumai – esminiai.

Šaltinis – LAMMC ŽI Vokės filialas

Avižų derlingumas lengvame smėlžemyje, taikant skirtingas tręšimo technologijas, 2022 m.



Pastaba – skirtingomis raidėmis (a, b, c, d) pažymėtų stulpelių skirtumai – esminiai.

Šaltinis – LAMMC ŽI Vokės filialas

Bandymų rezultatai parodė, kad geriausi javų derlingumo rezultatai pasiekti variantuose, kuriuose panaudotos organinės ir mineralinės azoto trąšos, arba tik mineralinės trąšos. Variantuose, kuriuose naudotos vien tik organinės trąšos, derlingumas buvo mažesnis nei kituose. Tokius rezultatus galėjo lemti tai, kad, naudojant vien tik organines trąšas, augalams intensyvaus augimo tarpsniais stinga maisto medžiagų, dėl to suformuojamas mažesnis augalų produktyvumo elementų – produktivių stiebų, grūdų skaičius.

Papildomai patręšus skystomis mikroelementinėmis trąšomis galima praturtinti augalus. Skystos seleno trąšos padidino seleno kiekį nuo 2 iki 3 kartų tiek grūduose, tiek biomasėje (šiauduose). Vasariniuose miežiuose panaudojus seleno trąšas, seleno kiekis grūduose siekė nuo 0,25 mg/kg iki 0,32 mg/kg, o

netręštuose variantuose šis rodiklis neviršijo 0,1 mg/kg.

Avižose seleno kiekis varijavo nuo 0,08 mg/kg juo netręštuose laukeliuose iki daugiau kaip 0,29 mg/kg papildomai selenu patręštuose laukeliuose. Silicio trąšos esmingesnės įtakos augalų produktyvumui neturėjo. Be tręšimo, augalų produktyvumą neretai lemia ir meteorologinės sąlygos per vegetaciją. Jos gali veikti ir panaudotų priemonių efektyvumą.

Planuojant tręšimą reikėtų racionaliai įvertinti dirvožemio ir augalų potencialus, kad būtų pasiektas rentabilus derlingumas. Geriau maksimalus ūkio pelningumas nei maksimalus, bet labai brangus derlingumas.

Dr. Virmantas POVILAITIS,
dr. Renaldas ŽYDELIS
LAMMC Žemdirbystės institutas
Dr. Eugenija BAKŠIENĖ
LAMMC ŽI Vokės filialas

Biofortified and climate resilient food and fodder production on marginal soils

Virmantas Povilaitis^{a*}, Renaldas Žydelis^a, Eugenija Bakšienė^a, Renata Žvirdauskienė^a, Šarūnas Antanaitis^a, Wiesław Szulc^b, Peter Schröder^c, Evelin Loit^d, Francois Rineau^e, Michel Mench^f, Beata Rutkowska^b

^a *Lithuanian research centre for agriculture and forestry, Institute of agriculture, Lithuania*

^b *Warsaw University of Life Sciences, Poland*

^c *Helmholtz Zentrum München, Germany*

^d *Estonian University of Life Sciences, Estonia*

^e *Hasselt University, Belgium*

^f *Institut National de la Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE)*

***Corresponding author:** virmantas.povilaitis@lammc.lt

In line with the decreasing surface of arable soils and progressive climate changes, will increase demand to develop new options to sustainably increase both yield and quality of food and feed crops and climate change-resilience of agroecosystems in EU. There is a chance to activate idle and marginal land for food and non-food crops. High amounts of quality biomass can be produced on marginal soils by improving their physico-chemical properties using amendments made from agricultural by-products and biofortification of food/fodder crops (e.g., Se). The application of various fertilizer in marginal soils can have a positive effect if the environmental conditions are favourable for the plant productivity realization. Also, the different types of fertilisers and fertilisation intensity could affect the diversity and viability of the soil microorganisms.

With this goal being carried out the project involve partners from six different Europe countries – Estonia, Lithuania, Poland, Germany, Belgium, and France. The aim of this project is to assess possible changes in crop yields in marginal soils by supplementing crop production technologies with biofertilizers or various additives of organic origin, such as silicon. It is believed that the addition of silicon fertilization to agricultural crop production technologies will increase crop resistance to biotic and abiotic stresses and achieve higher plant productivity levels. The field experiments are conducted in four countries and include different climatic conditions – Germany, Poland, Lithuania and Estonia. There are grown the same variety of spring barley, according the same agrotechnology in all countries. For fertilization are use the compost pellets and mineral fertilisers, also applied silicon (Si) and selenium (Se) foliar fertilisers

The organic fertilisers are important factor to increase the productivity of crops and improves properties of marginal soils. Meteorological conditions also determine the productivity of crops and effectiveness of the applied measures. The soil moisture is very important in light soils, especially during crop vegetation. In Lithuania, the prevailing soil in field trial is sandy soil and the moisture of such soil is varied during crop vegetation (figure 1).

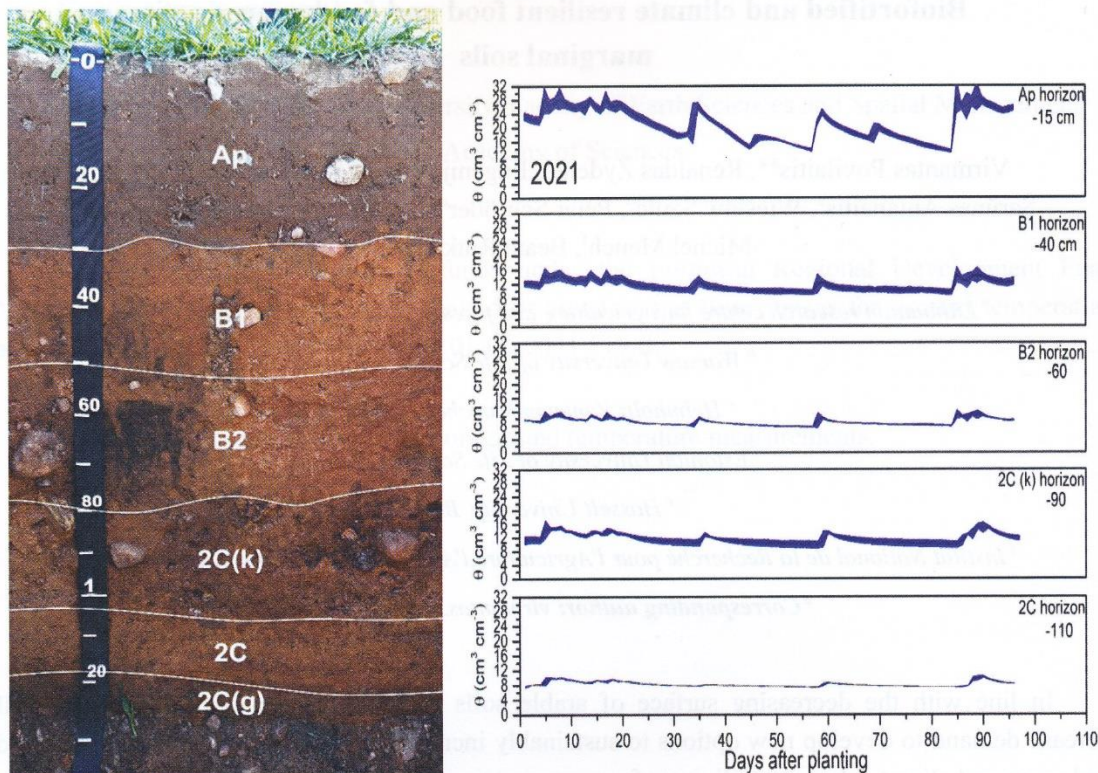


Figure 1. Sandy soil (SDp-b) soil profile and the variation of soil moisture at different genetic horizons in 2021, at Voké experimental site

The “Biolog” ecoplate method was used to assess the functional diversity of microorganisms. In 2020, soil samples were taken during the vegetation period to evaluate the indicators reflecting the activity of microorganisms - AWCD, R and H. The evaluation of soil microorganism activity in soil showed that check treatment and treatment with mineral fertilisers with applied additionally with foliar silicone fertiliser have the highest abundance of microorganisms.

Spring barley uses both mineral fertilizers and organic or organic and mineral fertilizer complexes in a sufficiently efficient way to realize its productivity potential in marginal soils, but the uptake of phosphorus and potassium was lower. Therefore, when planning fertilization technology in marginal soils, it is important to take into account the natural properties of the soil in order to use resources more efficiently.

Acknowledgment. All authors are partners in the BioFoodOnMars Project funded by the EU-FACCE-SURPLUS within the FACCE-JPI. Authors are grateful for the financial support obtained from the national funding organizations, and for the support by the FACCE-office.

Keywords: marginal soils, crop production, biofertilizers, organic additives.



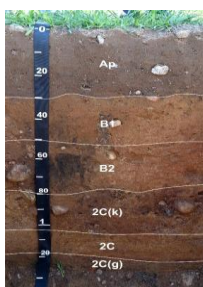
Įvairios agropriemonės augalų produktyvumo stabilumui mažo našumo dirvožemiuose

Virmantas Povilaitis, Renaldas Žydelis, Eugenija Bakšienė, Renata Žvirdauskienė, Šarūnas Antanaitis



Tarptautinis projektas „Biologiškai tvarios ir klimatui palankios augalinės produkcijos maistui ir pašarams auginimas mažo našumo dirvožemiuose“ (pavadinimas anglų kalba: Biofortified and climate - resilient food and fodder production on marginal soils (BioFoodOnMars)), vykdomas 6-iose Europos valstybėse – Estijoje, Lietuvoje, Lenkijoje, Vokietijoje, Belgijoje ir Prancūzijoje).

Projekto tikslas yra padidinti potencialų augalų derlingumą ir sukurti augalinės produkcijos pridėtinę vertę mažo našumo dirvožemiuose skirtingose Europos agroklimatinėse zonose, naudojant įvairias biologines kilmės trąšas (įvairūs kompostai ir pan.), augalų kokybę ir produktyvumą didinančius pagerinimo priedus – seleną ir silicį. Projekto metu bus siekiama sukurti šiuolaikines valdymo priemones, kurios leistų tvariai intensyvuoti žemės ūkį ir būtų parankios agroverslui, ūkininkams ir kitiems suinteresuotiems naudotojams.



Lietuvoje tikslieji lauko eksperimentai vykdomi LAMMC Vokės filiale. Tyrimo vietovėje vyrauja pasotintas paprastasis smėlžemis (SDp-b) (LTDK-99); granulimetrinė sudėtis – priemelis ant žvirgždo. Dirvožemio ariamojo sluoksnio (0–20 cm) pH_{KCl} yra rūgštus (5.5), jame santykinai mažai organinių medžiagų.

Trešimui naudojama: organinių atliekų kompostas (paruoštas iš panaudoto grybų auginimo substrato, biodujų jėgainėje gauto biosubstrato, šiaudų); skystos silicio ir seleno trąšos, mineralinės trąšos



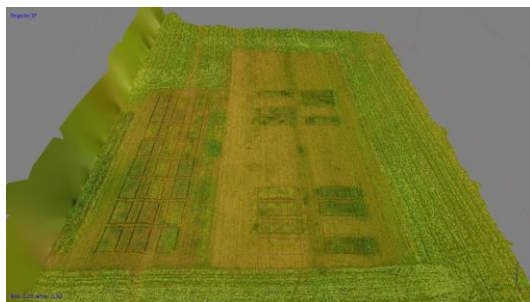
Paruoštos komposto granulės ir jų cheminė sudėtis

Lauko eksperimente pasiektas augalų produktyvumas ir kokybiniai grūdų rodikliai, taikant skirtingas tręšimo technologijas, LA MMC Vokės filialas, 2021 m.

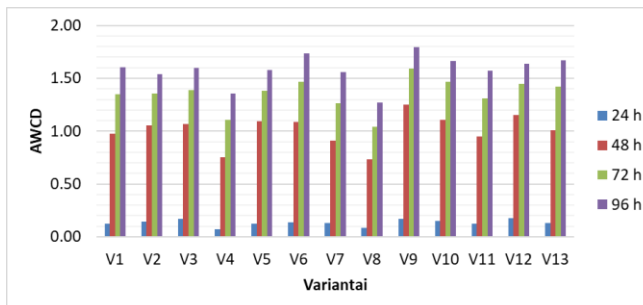
Variantai	Sausųjų medžiagų kiekis t ha ⁻¹				
	Antžeminės dalies biomasės	Grūdų derlius	Stiebai	Lapai	Pelai
1 Kontrolė	2.49 B	0.88 B	0.89 A	0.59 A	0.14 A
2 N100P80K140	4.66 A	1.91 A	1.65 A	0.83 A	0.27 A
3 N100P80K140 + Se	4.75 A	1.85 A	1.64 A	0.98 A	0.28 A
4 N100P80K140 + Si	4.97 A	1.95 A	1.72 A	1.03 A	0.27 A
5 N60P35K60	3.25 BA	1.23 BA	1.14 A	0.68 A	0.19 A
6 N60P35K60 + Se	3.57 BA	1.41 BA	1.23 A	0.73 A	0.20 A
7 N60P35K60 + Si	3.77 BA	1.29 BA	1.43 A	0.85 A	0.20 A
8 Komposto granulės (N170)	2.68 BA	1.04 BA	0.91 A	0.54 A	0.18 A
9 Komposto granulės (N170) + Se	3.30 BA	1.23 BA	1.25 A	0.63 A	0.19 A
10 Komposto granulės (N170) + Si	2.60 BA	1.05 BA	0.88 A	0.52 A	0.16 A
11 Komposto granulės (N120) + 30 kg N mineralinių trąšų	3.45 BA	1.49 BA	1.10 A	0.66 A	0.20 A
12 Komposto granulės (N120) + 30 kg N mineralinių trąšų + Se	3.26 BA	1.29 BA	1.10 A	0.66 A	0.21 A
13 Komposto granulės (N120) + 30 kg N mineralinių trąšų + Si	3.88 BA	1.57 BA	1.28 A	0.76 A	0.27 A

Variantai	Kokybiniai rodikliai			
	Baltymai, %	Krakmolas, %	Piltnis tankis, kg/100 l	
1 Kontrolė	29.74 BA	12.65 A	60.08 A	46.68 A
2 N100P80K140	34.35 A	13.20 A	61.00 A	48.10 A
3 N100P80K140 + Se	34.00 A	12.90 A	61.35 A	48.63 A
4 N100P80K140 + Si	31.74 BA	13.00 A	60.10 A	48.10 A
5 N60P35K60	29.01 BA	12.73 A	60.63 A	47.10 A
6 N60P35K60 + Se	30.07 BA	12.93 A	60.40 A	46.15 A
7 N60P35K60 + Si	28.78 BA	13.03 A	60.45 A	45.53 A
8 Komposto granulės (N170)	28.22 B	12.18 A	60.15 A	45.50 A
9 Komposto granulės (N170) + Se	28.12 B	12.63 A	60.18 A	45.73 A
10 Komposto granulės (N170) + Si	29.79 BA	12.63 A	59.98 A	46.48 A
11 Komposto granulės (N120) + 30 kg N mineralinių trąšų	31.03 BA	12.33 A	60.50 A	47.85 A
12 Komposto granulės (N120) + 30 kg N mineralinių trąšų + Se	30.24 BA	12.73 A	60.73 A	46.68 A
13 Komposto granulės (N120) + 30 kg N mineralinių trąšų + Si	31.04 BA	12.50 A	60.18 A	47.13 A

Pasinaudojant skaitmeninėmis nuotolinio vertinimo technologijomis ir atlikus koreliacinę -regresinę analizę gauta, kad stipriausia priklausomybė tarp grūdų derliaus ir vegetatyvinių indeksų buvo intensyvaus stiebo augimo metu (BBCH32), tuo metu R² svyravo tarp 0,4 ir 0,7.



Taikant skirtingas tręšimo technologijas, veikiamas ne tik augalų produktyvumas, bet ir dirvožemyje esančių mikroorganizmų gausumas ir aktyvumas. Laikoma, kad mėginiai, kurių AWCD pokytis yra didesnis, turi didesnę anglies šaltinio panaudojimo pajėgumą ir turi didesnę mikroorganizmų gausą.



FACCE SURPLUS
SUSTAINABLE AND RESILIENT AGRICULTURE
FOR FOOD AND NON-FOOD SYSTEMS



LIETUVOS RESPUBLIKOS
ŽEMĖS ŪKIO MINISTERIJA



Discussion

Relaunch cropping on marginal soils by incorporating amendments and beneficial trace elements in an interdisciplinary approach



Peter Schröder^{a,*}, Michel Mench^c, Virmantas Povilaitis^b, Francois Rineau^d, Beata Rutkowska^e, Michael Schlöter^a, Wiesław Szulc^e, Renaldas Žydelis^b, Evelin Loit^{f,*}

^a Helmholtz Zentrum München, German Research Center for Environmental Health GmbH, Research Unit for Comparative Microiome Analysis, D-85764 Neuherberg, Germany

^b Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry, Akademija LT-58344, Kedainiai distr. Lithuania

^c Univ. Bordeaux, INRAE, BIOGECO, UMR 1202, F-33615 Pessac, France

^d Hasselt University, Agoralaan Gebouw D, B-3590 Diepenbeek, Belgium

^e Warsaw University of Life Sciences - SGGW, 02-787 Warsaw, Poland

^f Estonian University of Life Sciences, Chair of Field Crops and Plant Biology, 51006 Tartu, Estonia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 May 2021

Received in revised form 16 August 2021

Accepted 18 August 2021

Available online 27 August 2021

Editor: Damia Barcelo

Keywords:

Marginal soils

Agricultural management

High carbon amendments

Micronutrients

Fortification

Soil microbiome

ABSTRACT

In the EU and world-wide, agriculture is in transition. Whilst we just converted conventional farming imprinted by the post-war food demand and heavy agrochemical usage into integrated and sustainable farming with optimized production, we now have to focus on even smarter agricultural management. Enhanced nutrient efficiency and resistance to pests/pathogens combined with a greener footprint will be crucial for future sustainable farming and its wider environment. Future land use must embrace efficient production and utilization of biomass for improved economic, environmental, and social outcomes, as subsumed under the EU Green Deal, including also sites that have so far been considered as marginal and excluded from production. Another frontier is to supply high-quality food and feed to increase the nutrient density of staple crops. In diets of over two-thirds of the world's population, more than one micronutrient (Fe, Zn, I or Se) is lacking. To improve nutritious values of crops, it will be necessary to combine integrated, systems-based approaches of land management with sustainable redevelopment of agriculture, including central ecosystem services, on so far neglected sites: neglected grassland, set aside land, and marginal lands, paying attention to their connectivity with natural areas. Here we need new integrative approaches which allow the application of different instruments to provide us not only with biomass of sufficient quality and quantity in a site specific manner, but also to improve soil ecological services, e.g. soil C sequestration, water quality, habitat and soil resistance to erosion, while keeping fertilization as low as possible. Such instruments may include the application of different forms of high carbon amendments, the application of macro- and microelements to improve crop performance and quality as well as a targeted manipulation of the soil microbiome. Under certain caveats, the potential of such sites can be unlocked by innovative production systems, ready for the sustainable production of crops enriched in micronutrients and providing services within a circular economy.

© 2021 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. The problem

By 2050 the world's population will exceed 9 billion, and global temperatures will have increased so that the world has to face prolonged drought periods and lower water availability. Dramatic, more intense hurricanes (Asia, Florida, even in France/Italy/Greece due to warming of the Mediterranean Sea, etc.) and periods of tremendous floods (last time in central Europe, China, also Thailand/Japan/Vietnam, etc.), as

well as rivers running dry result from increased temperatures, and reduction of forests and increase of the interface between natural areas and periurban/agricultural areas promote changes in life cycles of pests and biological auxiliaries.

Moreover, our focus on bioeconomy will change crop production, and it can be expected that agriculture of the future has to produce more raw materials to be used in multiple refinery processes, while reduction of forests and increase of the interface between natural areas and periurban / agricultural areas promote changes in life cycles of pests and biological auxiliaries (Shahzad et al., 2021). And finally, global pollution levels and high impact farming have induced a strong decline in soil quality, making a sustainable use of land more challenging than in the past (FAO, 2017).

* Corresponding authors.

E-mail address: peter.schroeder@helmholtz-muenchen.de (P. Schröder),

Evelin.Loit@emu.ee (E. Loit).

Consequently, one main challenge for agriculture will be to ensure food security and safety under these conditions, and to sustainably produce high-quality crops for an ever-increasing human population. Current estimates suggest a surplus in food production by approximately 70–85% is needed (Dhankher and Foyer, 2018).

In 2014, a FAO report shocked the community with a forecast, indicating if current rates of soil degradation would continue, the world's top-soils could be gone within 60 years (<https://www.scientific-american.com/article/only-60-years-of-farming-left-if-soil-degradation-continues>). While this was certainly a publicity-oriented exaggeration, it made clear that in line with decreasing productivity of arable soils and progressing climate change, agricultural science and practice will have to develop new strategies to increase quantity and quality of food and feed crops around the world. It is also true that the expansion of croplands in recent decades has significantly reduced ecosystem services while it remains a fact that soils are a non-renewable resource. Different aspects of agriculture cause land degradation, contributing to this process in a variety of ways (Schröder et al., 2018). Although it is well established that pedoclimatic conditions should determine the local choice of agricultural management, it is obvious that globalization and commercialized production of seeds induced the opposite and today management is based on combinations of seeds, fertilizers, plant protection agents and machineries, proceeding without too much attention to soil heterogeneity. Hence, soil degradation might be caused by ploughing techniques, clearing of genuine vegetation, improper fallow periods, lack of crop rotations, heavy machines or overgrazing (Tepes et al., 2020). Other challenges to be faced by a modern agricultural production are the reduction of the use of plastics and the even stronger competition with alternative land use, e.g. photovoltaic power plants. Finally, excess application of mainly inorganic fertilizer to equalize yield will lead to nutrient leaching and new imbalances (DeClerq et al., 2018).

But other pressures on farms are equally high, both in terms of ecology and economy: Increasing production costs, implementation of EU taxonomy, low prices paid by supermarket chains, and restrictions for agrochemical use exert significant strain, especially on small farms. As an additional complication, most existing croplands have some low-yielding areas exhibiting physical and chemical problems such as low soil quality, water holding capacity, high compaction, susceptibility to flooding, erosion and acidity or salinity (Fig. 1). In many of the latter sites, costs for the remediation might be balanced through the profitability of the bioresources obtained through nonfood plant cultivation, i.e. biomass energy valorization, followed by biochar production (Marmiroli et al., 2018), or even by phytomining (Sheoran et al.,

2009). Approaches like those might lead to a circular system, getting revenues from novel on-farm activities and by-products.

These partially degraded areas are classified as marginally productive croplands (see Textbox 1) and, in addition to idle, abandoned croplands or long-term fallows, represent a considerable fraction of valuable land without proper management (Blanco-Canqui, 2016).

In Europe with its geographical gradient of temperatures and soil types, specific measures leading to sustainable growth of sound agricultural productivity and improved climate change resilience of agroecosystems are needed. This is also mirrored in the EU Green Deal of 2020. Thus, converting marginally productive areas to productive land could enhance both soil services and resilience of the landscape as a whole, and smart enhancement of the production efficiency of such areas is a timely demand, especially under constraints like reduced carbon and nutrient stocks in soil, higher frequency of extreme weather events, or system-inherent limitations such as the typical lack of livestock (and return of manure) in rural areas of Europe.

So far, research on ecosystem stability has concentrated on the role of biodiversity in maintaining ecosystem health: the lower the diversity, the more probable it is that a loss of species is followed by both, a loss of function and connectivity between key functional groups (Garlaschelli et al., 2003). Thus land use intensification has been considered a major reason for the losses of multi-functionality of soil ecosystems due to reduced diversity of species on all trophic levels (Felipe-Lucia et al., 2020).

2. The rationale: unlock the potential of marginal soils

To overcome the dilemmas described above, one strategy could be the enhanced use of the capacities provided by fallow land and marginal soils. Here a (re)activation strategy for the production of food, fodder, or non-food products might be beneficial (Schröder et al., 2018; Von Cossel et al., 2019). It seems well possible to produce relevant amounts of high-quality biomass on marginal soils after improving their physicochemical properties and nutrient availability. With view of current problems connected to stagnating productivity in rural areas, increasing amounts of waste and CO₂ emissions to the atmosphere, it is high time to develop novel concepts for marginal lands and organic waste fractions. Without management, erodible sites (see Fig. 2) could only store about 1 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ of C in the soil (Gebhart et al., 1994; Follett, 2001; Mi et al., 2014), a number that could be increased under smart farm management, e.g. when soil amendments derived from on-site agricultural by-products and wastes are applied (Urrea et al., 2019; Gebremikael et al., 2020). Such agricultural by-products (i.e.



Fig. 1. A (left): Marginal site on a farm in Upper Bavaria; Germany. The farmer abandoned the grassland years ago, since the revenue seemed too small and the management too complicated. The plot is used to park farm equipment and as lairage for the cattle of the farm. The former grassland has been overgrown by weeds like *Rumex*, *Atriplex*, *Ranunculus*, *Solanum* and others and has successively become less attractive for forage or animal husbandry. UAV imagery helps to identify weed density and soil heterogeneity (Photo: P. Schröder). B (right): Former brownfield soil at Saint-Médard d'Eyrans in southern France. The plot belonged to a wood preservation company and is polluted with Cu-PAH contamination, suffers from drought, and has only low organic matter and CEC. After discontinuing industrial activities, the owner was assessing soil remediation with phytomanagement options which proceeds slowly due to the low nutrient availability in the soil, see also table in the supplemental material (Photo: M. Mench).

Textbox 1

Definition of the term “marginality”. Excerpted from: Kang et al., 2013, Shortall, 2013, Brown, 2003.

Textbox 1

Marginal sites may be defined as regions at the rim or border of given prevailing dominant social, economic or political structures and exhibit spatial conditions that make them less or even unsuitable for a particular use than regions in the center of the structures (Shortall 2013). Hence, marginality is always linked to the set of mainstream functions assigned to the central area by certain actors (e.g. agriculture, industry, mining, residential area, etc.). Given this, locations characterized as marginal do not necessarily have to be geographically at the edge of active spaces, resources and information flows. Like brownfields they can even be in the center of former topical hotspots but still only contribute marginally to the quality of an area. Land-owner's perceptions seem to be affected by a combination of unfavorable biophysical (e.g., soil water capacity, temperature variability, and slope) and socioeconomic factors, among which farm size appears to be significant. Hence, the definition of marginality contains a pre-set suitability to integrate into overarching and generally accepted economic and geophysical structures and processes. In an agricultural context, Turley et al. (2010) define marginal lands as sites where:

- cost effective production of high quality crops is not possible under a given set of conditions,
- break-even economic margins define whether productivity on the land is high enough, and
- significant change in land use is most likely to be expected.

Still, in current literature, the use of the term “marginal land” is vague, unstable and ambiguous and may not be suitable as definition in scientific context, rather than a loose category of terms used to characterize a given type of land as: abandoned, additional, bad, degraded, fallow, free, idle, inappropriate, unused, unsuitable, spare, under-used, under-utilized, and set aside. Semantically, these terms are ambiguous and fluid, and interesting conceptual issues might be raised about the degrees of freedom such land might have.

The rationale of putting unprofitable, marginal farmland back into more productive use while meeting regional energy demands and ecological goals is an appealing one. Some use a hype about future technologies to raise expectations and tap into stereotypes of scientific progress leading to societal progress (Brown, 2003). Proposing the use of marginal land might raise inappropriate expectations about the production of abundant, sustainable biomass. The potential association of biomass production with marginal land or regarding crops grown there as marginal crops is for sure a hindrance to its development (Shortall 2013). Sites with historical burdens or lower productivity need to be gently remediated for sustainable usage, expecting restricted, but stable yields from well-designed inputs within a circular farm management.

straws, hulls, digestates, spent substrates, etc.) mainly contain primary residues with huge pools of untapped biomass which can, when treated properly, be either converted into bioenergy and bio-based products (i.e. fertilizers, energy, and raw materials) by cascading conversion processes within the circular economy, or applied to poor soils (Fig. 3). Typically, crop lignocellulosic biomass is comprised of about 10–25% lignin, 20–30% hemicellulose, and 40–50% cellulose, ideal as primers for carbon storage in soils (Iqbal et al., 2011). Similarly, biochars with different intrinsic capabilities might be applied, improving the

water holding capacity of soils and nutrient retention due to their chemical and electrical properties (Ruotolo et al., 2018). An important side effect of such amendments is the improved potential of the soil biomass to act as a temporal storage pool for nitrogen, phosphorus and other nutrients, as a result of a stable stoichiometry in the microbial biomass (Kamau et al., 2021).

From the point of circular economy, environmental protection and stabilization of organic matter in marginal soils, management of farm waste to produce domestic natural fertilizers is crucial. Systematic introduction of processed organic matter from the farm will improve physical and chemical soil properties, stabilizing yields and soils by fostering soil, microbiota and crop interactions (Schmid et al., 2018). When digestates from biogas production, or composts derived from different sources are returned to fields, carbon backbones, nutrients, and selected microorganisms are added to increase the functional potential and ecosystem services from soils (Nabel et al., 2017) and may induce positive feedback loops, towards improved resilience of a given soil. Thus, increased organic matter (OM) and water storage merged with best practices will produce surplus yields. And when a balanced alliance of perennials and food crops in the existing agricultural landscapes would be established, both, renewable energy security as well as food security could be achieved (Blanco-Canqui, 2016), with positive aspects for biodiversity and multifunctionality of soil ecosystems.

As has already been discussed in previous work (Schröder et al., 2018; Millán et al., 2019), all agricultural productivity options, to be economically sustainable, have to be regarded as a part of a value chain, in a scheme that has already focused on the reference market for product valorization before starting the reconfiguration of the land. In this context, amending abandoned sites with farm residues or composts can enhance cost-effectiveness on a farm (Figs. 4 and 5), and will also take effect in terms of wider economic, social, and environmental benefits, i.e. local and regional ecosystem services (Constantin et al., 2019), by improving the energy balance and increasing the content of soil organic matter by C sequestration (Gontard et al., 2018). Proper management of agricultural by-products, e.g. by transformation into biogas and energy recovery and production of organic amendments usable to improve the properties of marginal soils will contribute to reduced CO₂ emissions, promoting lower C footprints. In line with this, and after careful consideration of site specific conditions of given marginal soils, amendments made from sawdust or lignin could help to implement the recommendation of the French Ministry of Agriculture (Minasny et al., 2017), aiming to increase soil carbon pools by 4‰ per year, thus helping to mitigate the adverse climatic influence of anthropogenic CO₂ emission (Žydelis et al., 2019; Reichel et al., 2018).

Soils richer in organic matter can retain more water, which will be important, since drought stress alone will limit the productivity of more than half of the earth's arable land in the next 50 years. With view to novel legislation, and to the protection of waterbodies it will further be essential to introduce well designed N-management, keeping nitrogen in the amended soil and available for plant growth. Rapid N immobilization can occur under field conditions after incorporation of organic C-rich crop residues (Congreves et al., 2013; Reichel et al., 2018).

3. Identify and utilize key players of soil life

Soils have been recognized as ecosystems with the highest biodiversity on Earth, due to the unique variety of ecological niches they provide, which are shaped by the interplay of chemical, physical and biological soil properties (Bardgett and Caruso, 2020). Here soil microbes play a very important role and are often referred to as major architects of soil quality (Thiele-Bruhn et al., 2020). They drive nutrient turnover in soil, support plant growth, play an important role in the safeguarding of drinking water by degrading pollutants and are involved in carbon sequestration (Nannipieri et al., 2020). The most prominent impact of microorganisms on soil fertility in soils under agricultural use is their effect on nutrient availability by fixing or mineralizing nutrients from the



Fig. 2. Agricultural plots with sandy soils and low water holding capacity. A: experimental farm in southern Poland, close to Skirvieniė. Although permanently under agricultural management, the site suffers more and more from drought, and productivity has ceased. B: eroded slope in a tertiary hill-area of northern Bavaria, Germany. The plot is on the verge of the tertiary hill lands, the end moraines of the last glacial period. While the hill top is characterized by gravel and sand, the valley part is loamy. The patchy soil quality causes problems in fertilization management and C/N values, see also table in the supplemental material (Photos: W. Szulc, P. Schröder).

gross soil nutrient pool (Hayat et al., 2010; Bulgarelli et al., 2013). Some symbiotic microbes also contribute to water uptake or stimulate plant resistance towards pathogens (Rineau and Ladygina, 2013). Moreover, arbuscular mycorrhiza improves the uptake of micronutrients by plants (Munkvold et al., 2004). However, root pathogens may display detrimental interactions with plants and thus induce serious reductions of yield (Campbell and Noe, 1985).

Taking these important roles of soil microbiota into account, it is not surprising that the last two decades of research on ecosystem services and their resilience have concentrated on the role of (micro)biota and their diversity. It has been increasingly recognized that rather than individual taxa, connectivity and networks between key functional groups (keystone species) within a community determine soil functionality (Garlaschelli et al., 2003).

Microbiomes of highly productive sites have frequently been characterized by a large degree of functional redundancy (Nielsen et al., 2011). Consequently, disturbances causing species loss would have only limited functional impact since the disappeared species might be replaced by others with a similar role (Yachi and Loreau, 1999), which results in the

hypothesis that soil functions are expected to be quite stable and only disturbances causing a massive species loss may lead to disturbed functioning (Wei et al., 2019). This assumes that a large group of species carries all essential soil functions - which may not be the case for marginal sites. Even more, several studies have indicated that microbial diversity at marginal sites is lower than in highly productive sites (Schmid et al., 2020; Vuko et al., 2020), mainly when abiotic stressors might act as a filter towards a low-diversity one (Caruso et al., 2011). In addition, activity of microbiota at marginal sites might be strongly impacted due to low concentrations of nutrients (Zhu et al., 2020). This calls for practices to increase microbe-mediated soil functions (enhance their activity, for example of mineralization), but also to improve their stability (increase their diversity, or beyond that, their functional redundancy for given functions) in marginal soils. Moreover, stimulating microbial diversity has the extra advantage of decreasing the risk of invasion by pathogen species (van Elsas et al., 2012). In many cases focus is given on the response of the soil microbiome towards specific treatments, but surveys of soil mesofauna can be used as additional indicators to assess improvements in soil functionality (Schröder, 2008). This is important since soil fauna is bottom-up regulated by microorganisms and plants, and energy transferred along food webs can either flow through detritus or the plant-based energy channels (Domene, 2016). The detritus-based pathway includes soil animals feeding from microbes (bacterivores or fungivores) and consumers (detritivores), while the plant-based pathway involves plant biomass feeders (herbivores).

Plants provide carbon during growth as exudates or during decay as litter. In this respect root morphology has been considered as an important factor, which does not only influence soil structure but also the distribution of “hotspots” (zones of increased microbial activity, but low diversity) and “coldspots” (zones with low activity and mostly dormant microbes of high diversity). Since the microbes acting as drivers for nutrient turnover in hotspots are recruited from “coldspots” spatial heterogeneity in soil is an important issue which triggers functionality and resilience. Taking the importance of plants as drivers for below ground biodiversity into account, it is obvious that mainly at marginal sites the selection of the right plant and cropping sequences is essential for the activation of the microflora and its functioning. This might include the use of deep rooting plants to mobilize nutrients from deeper soil layers (Thorup-Kristensen et al., 2020), where it has been shown that species like Lucerne, Sunflower, Sugarbeet or Summer wheat might penetrate 5, 2, 3 or 2 m, respectively, into soils and retrieve water from these depths while also introducing root exudates at the same time. Similarly, catchcrops and intercropping can be used to improve the retention of nutrients while perianual crops may promote soil structure development.



pH	C _{org}	N	S	P	Na	Ca	Mg	K
g·kg ⁻¹								
6.7	158,7	12,8	1,49	11,05	1,02	84,57	5,39	10,71

Fig. 3. Pellets produced from spent mushroom substrate, bio-rest from biogas production and straw or brown coal as amendments to topsoils on selected sites. The constituents are mixed according to the requirements of the fertilizer, pressed and dried. The composition of the pellets is kept stable to reach marketable quality. Chemical quality (see table) and levels of potential contaminants are checked on a regular basis. (Photo: W. Szulc).

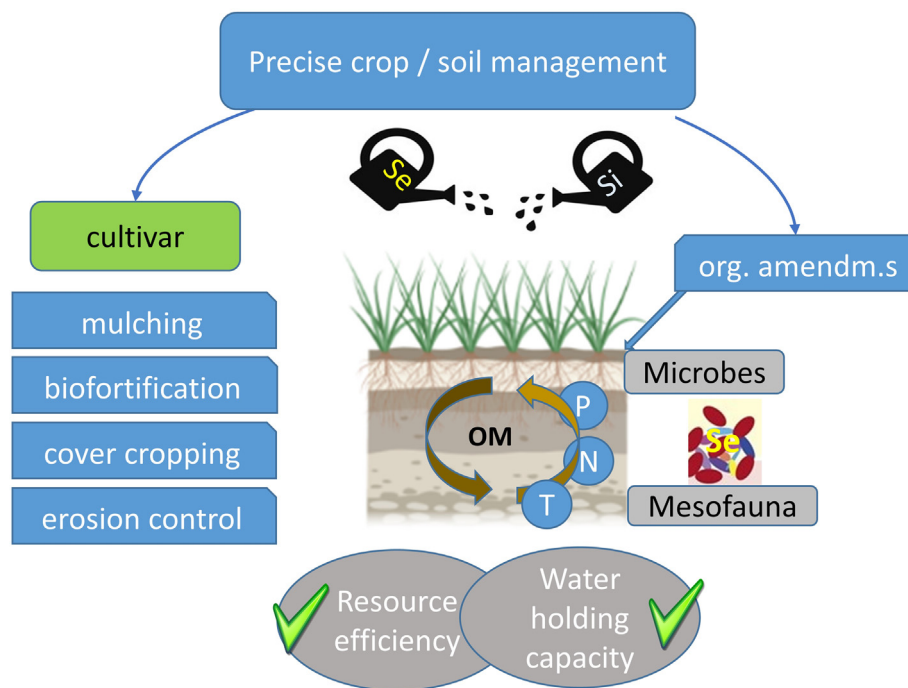


Fig. 4. Precise crop and soil management and targeted amendment of beneficial elements like selenium (Se) and/or silicon (Si) will improve plant performance and influence agricultural resource efficiency and water holding capacity. T: trace metal(loid)s, P: phosphorus, N: nitrogen, and OM: organic matter.

Fertilization is another important factor to trigger microbial diversity and activity pattern. The stoichiometry of nutrients, mainly the ratio of C:N:P, acts as a driver by which microbial processes are activated (Rineau et al., 2013; Reichel et al., 2018; Esmailzadeh-Salestani et al., 2021). While application of fertilizers in many regions is combined with irrigation, e.g. as fertigation or chemigation, the projected systems would be rainfed. Still, in high productive soils the use of inorganic fertilizers will induce the utilization of carbon to maintain a stable stoichiometry of the microbial biomass (Reichel et al., 2018). However, since available carbon is often one of the limiting factors at marginal sites, the use of inorganic fertilizers might be critical, as it will not induce microbial activities in a significant manner and result in leaching of nutrients to deeper soil layers and the groundwater (Zhao et al., 2011).

Organic fertilizers like manure could be considered, since here carbon is applied together with nutrients like N and P. However due to the labile nature of the applied carbon, manure might not be sustainable to manage marginal sites as it induces a flush of microbial activity resulting in a loss of carbon in form of CO₂ (Das et al., 2017). Furthermore, together with the nutrients also microbiota from the gut of the

animals is applied to soil, which could result in an increase of potential human pathogens in such soils (Ekman et al., 2021). Compost amendments might be a good alternative, but they bear the risk of contamination with pollutants like heavy metals or μ -plastics (Watteau et al., 2018). Similarly, the quality of compost material may be differing as it strongly depends on the origin of the parent materials (Hasan et al., 2012). The addition of high carbon amendments (e.g. saw dust or biochar) could also be a solution, as it will stabilize physico-chemical soil structure, and induce a sustainable increased activity of the soil microbiome due to a continuous slow release of easy degradable carbon from the applied matrix as a matter of decay. Substrate availability might be modulated by clay contents, mineralogy, and soil carbon content (Guimarães et al., 2013). In addition, managing soil mineral N after harvest during times without sufficient winter crop N-uptake is of ample importance to reduce N-losses and improve the field N use efficiency (Zhang et al., 2015). In a previous study (Obermeier et al., 2019) it had been shown that the successful transformation of a marginal grassland to arable land via a transitional nitrogen fixing phase was successful when a leguminous crop was used to incorporate nitrogen by



Fig. 5. Field trial with compost amendment at a former wood preservation site, St-Médard d'Eyrans, France. Short rotation coppice (black poplar and willows) in year 6 after the compost incorporation into the soil and transplantation of mycorrhizal trees. Soil is remediated and prepared to multiple uses, see also table in the supplemental material (Photos: M. Mench).

biological fixation, and green manure. During growth of *V. faba* a strong enrichment of nitrate-N and total biological nitrogen was observed, and the later incorporation of the leguminous plant residues (Ordóñez-Fernández et al., 2018) led finally to the high amount of 50 µg nitrate-N g⁻¹ dw (150 kg N/ha) which is already sufficient as a starter for crop cultivation. Available soil N will be immobilized after application of decomposable, C-rich organic residues with wide C:(N:P) ratios, such as wheat straw or amendments with mixed C-sources (Cheshire, 1999; Reichel et al., 2018). Even if changes in soil C-stocks might not be significant in the first few years after establishment, depending on the initial soil C-levels (Evers et al., 2013; Schmer et al., 2012), conditioning marginal soils with such amendments will obviously lead to stabilize nutrient cycling, reestablish trophic levels within food chains, better water availability, and yield security.

Finally the use of microbial inocula might be a possibility to increase the functional repertoire of marginal soils. Microbial inocula have been used in agriculture since a long time mainly to increase the number of symbiotic bacteria in soil during the cultivation of legumes. More recently, also other functional traits, for example related to the biocontrol of pathogens are introduced into soil by inoculation of microbiota to soil successfully (Malusá et al., 2012). In this context, discussion is ongoing whether synthetic consortia could be beneficial to deliver a broader spectrum of functions into soil (Vorholt et al., 2017). Even the transplantation of microbiota from soils with good soil quality has been used mainly for the recultivation of sites (Schmid et al., 2020). All these approaches require however that the inoculated microbiota find their ecological niches to ensure their survival in soil. This requires mainly for marginal sites an in depth understanding of the physiology of the applied microorganisms to develop the fitting niches e.g. by application of the optimal plants or the best fitting fertilizers mirroring the nutrient requirements of the respective bio fertilizers (Hayat et al., 2010; Bulgarelli et al., 2013). Similarly, acquisition of micronutrients by arbuscular mycorrhiza (AM) plants depends on the AM fungal genotype in the symbiosis (Munkvold et al., 2004), hence one could hypothesize that the nutrient composition in a plant would be a consequence of functional compatibility with the AM symbiosis (Ravnskov and Larsen, 2016). Thanks to their ability to secrete many enzymes, soil microbes mineralize organic nutrients, making a fraction of them available for plants.

4. Enhance product quality

There are concepts to generally use marginal sites mainly for agroforestry and bioenergy plants etc., to spare the use of highly productive sites for crop production (Zou et al., 2019). Adding high carbon amendments is an important step for sustainable management of such sites, but on many marginal sites micronutrients are also growth limiting factors and should be added. Hence, it should be possible to raise gross productivity on soils of lower performance, in a site specific manner for edible crop production, and increase in parallel crop resilience and quality, the latter especially in terms of micronutrient content. In many cases, nutrient availability seems to cause low crop quality (Rashid and Ryan, 2004). Such increases in product quality can eventually be obtained by applying biofortification techniques for food and fodder (Table S1). Surveys across the EU have shown that micronutrient intake of the population is insufficient (Mensink et al., 2013). Consequently, some authors suggest a food-chain approach to meet the micronutrient demands of livestock and humans. This requires inter-disciplinary collaboration between stakeholders in agriculture, environment and health (Watson et al., 2012). With view to application techniques, biofortification, like every fertilization model, could not be proposed outside a precision agriculture approach considering also the nanoparticle formulation of many chemicals (Tarafer et al., 2020).

Agronomic options to enhance product quality and integrated nutrition chain management by adding micronutrients are advocated by several organizations as immediate strategies to address this topic since

micronutrient-biofortified fodders and food can improve animal and human nutrition and health (Fan et al., 2008; Garg et al., 2018; Novoselec et al., 2018). In this context, it is ever so important that the risk of overfertilisation should be considered. Gentle biofortification will address this and lead to the final aim of providing healthier nutrition. Accordingly, Pompano and Boy (2021) provide unequivocal evidence that biofortification of staple foods with essential trace elements, in this case Zn, provides low doses of the dietary required element regularly and consistently over time. The results of their meta-analysis suggest that such a low-dose, long-duration zinc intervention may reduce multiple risk factors for type 2 diabetes (T2D) and CVD (cardiovascular disease) related to both glycemic control and lipid metabolism (Pompano and Boy, 2021). It is likely that even a modest increase in dietary zinc intake from the consumption of biofortified crops, shifting probands from the lowest intake quantile to a middle quantile, could have a meaningful effect on their risk of developing T2D or other chronic diseases (Pompano and Boy 2020).

To date supplying staple crops with micronutrients is standard in some regions (Welch and Graham, 2004; Dimkpa and Bindraban, 2016), and might be an option for novel approaches on marginal lands (Foley et al., 2021; Trippe and Pilon-Smits, 2021; Buturi et al., 2021).

4.1. Zn

Zn deficiency is widespread and estimated to affect a huge proportion of the world's population of both developing and highly developed countries. It is primarily caused by the consumption of considerable amounts of products of cereal origin with Zn content substantially lower than in animal products. Bread wheat is the basis of the diet of 35% of the global population (Cakmak and Kutman, 2018). It is estimated that at the global scale, even 50% of wheat is cultivated on soils with insufficient Zn availability for plants. In such conditions, plants cannot fully use their capacity for Zn uptake and accumulation, resulting in reduced content of the element in the grain. Zinc concentration in the soil solution significantly decreases with an increase in soil pH, contributing to a decrease in the mobility of the element and its availability for plant roots. Like high soil pH, low soil moisture and low content of organic matter considerably limit Zn availability for plants (Rengel, 2015; Rutkowska et al., 2015). In Europe, Zn deficits occur in calcareous soils (Calciols) in Austria, Bulgaria, Cyprus, France, Greece, Portugal, Spain, and Turkey, but also in sandy soils in France, Ireland, the Netherlands, Poland, Portugal, Sweden, and Switzerland (Sinclair and Edwards, 2008). If we consider that micronutrient deficit is more pronounced when it occurs in soils suffering from marginality symptoms, it might be an option for the improvement of such sites to start amending them with lacking minerals to reach better crop quality. For local populations, daily micronutrient intakes necessary to support health and immune function may be higher than recommended uptake levels (Gombart et al., 2020). Aiming at a final return of impoverished sites to productivity justifies their preparation for this goal even in early stages of the conversion process.

The success of biofortification depends on several variables such as the elemental species of choice, the mode of application, and the crop species. Zinc has been in the focus of nutritionists for a long time, since it is essential in all organisms as a cofactor of over 300 enzymes and plays critical structural roles in many proteins, including countless transcription factors (Palmgren et al., 2008). According to a WHO report, Zn deficiency ranks fifth among important health risk factors (Palmgren et al., 2008). Many studies have emphasized that Zn occupies a dynamic role in cellular signaling pathways, controlling insulin signaling transduction and glycaemia (Kambe et al., 2014). ZnT8 plays an indispensable role in supplying zinc to insulin granules in b-cells to form insulin-Zn crystals. In a line of ZnT8-KO mice, the dense core of Zn-insulin crystals is lost because of lacking zinc. Hence, while adequate Zn content could well enhance crop productivity, Zn-enriched cereals would potentially also generate major health benefits. Moreover, Zn

biofortification, while being successful at increasing Zn bioavailability in grains, also does not interfere with the bioavailability of other micronutrients such as iron, manganese, or copper in wheat flour (Liu et al., 2017).

4.2. Se

Selenium content in soils is primarily determined by the bedrock from which the soil developed. Its content depends on soil origin and geological history, mineralogy, type and texture, organic matter content, and eventually deposition (Hartikainen, 2005; Mehdi et al., 2013). More than 80% of the global selenium resources are accumulated in Chile, the USA, Canada, China, Zambia, Zaire, Peru, the Philippines, Australia, and Papua New-Guinea. Soils developed from igneous, sedimentary, and metamorphic rocks are usually poor in Se. Particularly soils in countries of Central-East and North Europe are characterized by low selenium content, and plants providing the basis of the diet, such as cereals, or fodder plants, e.g. grasses, contain insufficient amounts of Se (Krustev et al., 2019; Lopes et al., 2017; Gupta and Gupta, 2017). Insufficient Se content in crops is also related strongly to soil properties such as pH, Eh, organic matter content, or clay particles, influencing Se mobility (Trippe and Pilon-Smits, 2021). Alkaline soils are dominated by more mobile forms of Se^{6+} (selenians). Soils with neutral and acidic reaction are dominated by selenites (Se^{4+}) which, due to strong sorption by oxy-hydroxides, are characterized by considerably lower mobility in the soil (Tolu et al., 2014; Schiavon et al., 2020). Evidence arises that climatic conditions have an impact on Se content in plants. Selenium content in grains of cereals cultivated in dry climate is higher than in humid climate, probably related to the resistance of selenium to leaching, particularly from sandy soils (Garousi, 2017; Jones et al., 2017).

Because of the chemical similarity between Se and sulfur (S), the behavior of Se in higher plants is closely related to sulfur metabolism. Some plant endophytes accumulate selenium from soil and provide it to the plant, in turn benefiting plant's growth. These selenobacteria may improve selenium biofortification in crops even under drought stress. Above all, Se seems to play a role in increasing activities of glutathione peroxidases (GPX) contributing to the detoxification of reactive oxygen species, since it participates in the active site of these enzymes. GPX activities appear quite active in plants subjected to various abiotic stresses such as drought, salinity and metal(loid) toxicity (Viciado et al., 2019). Selenium has also been shown to exert effects on human health, and biofortified food can prevent the onset of diseases related to low intake of this micronutrient (Alfthan et al., 2015; Vinceti et al., 2018). Although speculated in the beginning, several clinical studies did not support a role for Se in the development of T2D (diabetes), since groups who received Se or placebo for 3 years did not show any differences, and fasting blood glucose concentrations were higher for those in placebo groups compared to Se-treated groups (Jacobs et al., 2019).

4.3. Fe

The primary cause of iron deficit is diet based on products rich in starch, and poor in mineral elements, including Fe, such as rice, wheat flour or potatoes (Connorton and Balk, 2019). Agricultural soils show relatively high content of iron in a range from 20 to 40 g kg⁻¹ but the availability for plants is low. Depending on the physico-chemical properties of soils, even 92% of Fe in soil can occur in forms unavailable for plants. High soil pH, presence of free calcium carbonates, and low content of organic matter contribute to this effect, and cause Fe deficit in plants (Connolly and Guerinet, 2002). In Europe, the problem particularly concerns calcareous soils in the south of the continent (Colombo et al., 2014; Zahedifar, 2020). In wholegrain products, Fe content is similar to that in animal products. In cereal grains, however, Fe primarily accumulates in the embryo and aleurone that are removed during

grinding of grain for flour. Plant products also contain anti-nutritional polyphenols and phytic acid, limiting absorbing of iron in the digestive system (Connorton and Balk, 2019).

4.4. I

The diet of EU residents also shows deficits of iodine. Content of I in soils is variable. Soils of coastal regions are richer in the element than those located far from the sea, or soils from mountain areas. Organic matter content in the soil also affects iodine content. Organic (peat) soils and soils with high content of organic matter are higher in I than sandy mineral soils (Fuge and Johnson, 2015). Iodine is not essential for plants, and can be toxic at higher concentrations. Its content in plant tissues is generally low, not exceeding 1 mg kg⁻¹ dry mass. Such low levels are not sufficient to meet the nutritional needs of humans and animals, although plant products still constitute the primary source of the element (Duborská et al., 2020; Fuge and Johnson, 2015). Many countries undertake obligatory fortification of salt in iodine, according to research of the Iodine Global Network (Brough et al., 2016), but deficits of the element still occur. One of the reasons for the decreasing iodine intake in European countries is the increasing consumption of "trendy salt" (e.g. crystal salt from the Himalayas or sea salt), leading to iodine deficits in Germany, Norway, Finland, Lithuania, Ukraine, and Estonia.

4.5. Si

Silicon amendments are known to enhance plant resistance to stressors such as drought and pathogen attacks (Vaculík et al., 2020), which are especially critical in marginal soils, where plants are already mobilizing resources to face pollution or low organic matter (Fig. 6). Moreover, drought (Stocker, 2014) and pathogen prevalence (Scheffers et al., 2016) are expected to be among the main threats to crops under a future climate. Silicon (Si) amendments appear well suited to improve crop quality and climate adaptation, and reduce the need for agrochemicals because not only should crop yield increase, but water consumption by evapotranspiration be reduced (Szulc et al., 2015), and crops stay active at lower soil water potential (stronger suberization of the endodermis). The latter would also favour retention of non-essential metal(loid)s in the roots and promote food safety. The advantages of Si fertilization have been recognized only few decades ago, and Si has finally (Drechsel et al., 2015) been upgraded by the International Plant Nutrition Institute (IPNI) as important and beneficial mediator of plant health (www.ipni.net/nutrifacts). Due to the advancement of genomics and the discovery of Si transporters, new opportunities have become available to characterize accumulator and non-accumulator plants on the basis of specific molecular features (Coskun et al., 2018). Any case, the water potential of Si-applied drought-stressed plant leaves is elevated, suggesting improved drought resistance (Zhu and Gong, 2014). Beneficial Si effects include also decrease in seedborne, soilborne, and foliar diseases caused by biotrophic, hemibiotrophic, and necrotrophic plant pathogens, due to Si influence on host resistance, i.e. incubation period, lesion size, and lesion number (Debona et al., 2017). It might be expected that amended plants allocate less energy to fight drought stress, leading to increased pathogen resistance and enhanced biodegradation of xenobiotics by soil microbes in the rhizosphere. Importantly, silicon also contributes to reducing the greenhouse effect and to enhance soil organic content through stable carbon sequestration. At present, one of the most promising mechanisms of biogeochemical sequestration of carbon in soil is its occlusion in plant phytoliths (PhytOC). Phytoliths are mainly composed of silica (SiO_2 - 6691%), and their amount in plants is positively correlated with Si availability (Song et al., 2012, 2013, 2014). During the production of phytoliths in plant tissues, 0.5 to 6% of organic carbon is incorporated into their structures. Phytoliths are among the most stable and recalcitrant organic carbon fractions in soil (Zhang et al.,



Fig. 6. example for a fully automated plant-soil ecotron with options to simulate climate extremes. Hasselt University, Belgium. Photo: F. Rineau.

2019), resulting in lifetimes of 200 to 1000 years, and the amount of carbon bound in PhytOC of 7.28.8 kg/ha/year, may represent 30% of the total amount of organic carbon stored in the soil. Globally, PhytOC production in agricultural ecosystems is 16–44 Tg CO₂ per year, of which more than 80% originates from cereals. Thus, they have a high potential for long-term carbon sequestration (Baveye and White, 2020).

Novel data suggest that silicon is also an essential trace element in mammalian nutrition and an indispensable factor in bone development and connective tissue health (Martin and Bettencourt, 2018). Several potential dietary sources have been identified, but since silicon availability from foods is low, it may be prudent to increase intake from edible parts of plants via biofortification (Martin and Bettencourt, 2018), see Supplementary Table 1.

5. Integration of primary production and end-user demands

Sustainable management options for crop production are often perceived as burdensome and non-profitable by landowners and stakeholders, especially when the general public perception of climate change or a malnutrition scenario seems erroneously distant in the future. However, the actual successful marketing of novel food labels representing organically produced or vegetarian food demonstrates positively how mindful a significant proportion of the end users have become when it is about daily nutrition and the key factors driving agricultural systems. This in mind it will be necessary to demonstrate the potential ecological and economic value resulting from the optimization of biomass production on set-aside or marginal soils, from site adapted fertilization and adaptation to climate change, from the use of new tools for assessing crop performance, and from the use of by-products as valuable fertilizers. This will of course have impact on the socioeconomic indicators of the system.

As a well-established approach, field sites with crop rotations adapted to the regional markets for biomass, food and green products can aid to demonstrate success / failure of options and at the same time adjust technology readiness levels to be reported to stakeholders. With a positive attitude for farming, local products can be negotiated to end-users (food and feed) or local processing industries (fibers, biomass, etc.) to ensure small carbon footprints. It must be understood that production on marginal lands may not be profitable in the beginning, unless other ecosystem services are included in the economic analysis. The conversion of marginal soil into grasslands can stop soil degradation, increase organic carbon accumulation in a long time

period, while establishment of short rotation coppice in marginal soils could stimulate soil degradation (Kazlauskaitė-Jadzevice et al., 2020). In essence, the argument that marginal lands will always be marginal due to their low productivity and adverse soil conditions can be rebutted in front of the public, opening the view to novel options of soil improvement through circular bioeconomy, a local “no-waste” management strategy, and increased ecosystem services.

The estimation of multiple ecosystem services in sustainable land management for crop production can valorize the implementation of these managing strategies, demonstrating their suitability and effectiveness beyond the typically used monetary terms, as they take into account wider economic, environmental, social and cultural benefits that can be provided from the soil ecosystem. Any case, the ecosystem functions (i.e., soil conservation, C sequestration, safeguarding of drinking water, environmental quality, and biodiversity) provided can be incentives to establish more production plans for marginal lands. This in view, new options to increase the amount of food and feed production and resilience of agroecosystems to climate changes in Europe can be developed (Blanco-Canqui, 2016, Kang et al., 2013, 2018, Zhao et al., 2011, Schimmelpennig, 2017, Newton et al., 2012).

6. Impact

Experimental data on biomass yields and other ecosystem services from the different types of marginal lands are few. Similar to the action plans connected to the agriculture 4.0 concept (Rose et al., 2021), tools have to be delivered to farmers to systematically change agricultural practices, using a combination of techniques, plants and management, aiming to increase high quality food and biomass production in a holistic approach.

A focus on plant-soil-microbe interactions in marginal lands will affect bioeconomy in the EU. Farmers will gain access to novel solutions, especially related to management of poor and degraded land and increased plant production on such sites, in an environmentally-friendly manner. Of course mixed plantations, and the inclusion of patches of perennials in degraded portions of existing croplands would create a multifunctional mosaic of perennial crops and food crops, including improved wildlife habitat and diversity, soil C sequestration, and soil and water quality, all of them contributing to the overall agricultural landscape diversification. On a regional scale the first goal should be to optimize regional selection of biofortification methods for plants, integrated nutrition chain management and more efficient distribution of

Table 1

Potential indicators and key-factors for the improvement of marginal soils. The indicators are markers of accomplishment/progress of system recovery. They represent specific, observable, and measurable accomplishments or changes in the agro-ecosystem that show the progress made towards achieving the relaunch of crop production in the given work plan. Involvement of stakeholders is advised to include practitioner's knowledge and experience.

Indicator	Measurable/quantifiable key-factor
Soil aggregation indices	Aggregate formation, soil texture, percentage of erosion protection
Soil physico-chemical properties	pH, bulk density, CEC, available forms of macro and micronutrients, traditional agronomic measure
Nutrient cycling	NPK, weathering of minerals, soil formation
CNP	Carbon/nitrogen/phosphorus contents, SOM, dynamics of sequestration
Contamination	Total and extractable contaminants (if any), against national threshold levels
Water	Water holding capacity, water retention, filtration, readily dispersible clay
Biodiversity	Diversity of species, including microbial diversity and PGPR occurrence
Crop quality	Plant health/growth/yield, pathogen attack to crops – quantify crop losses
Yields, harvest	Return of investment (for farmer, for community (estimate))
List of ecosystem services before/after the project	By counting, but also ranking services
"Value" of soil, crops, diversity	Market price, but also esthetical or environmental value
Farmer satisfaction	With type of management, within the community, with customers

water in agriculture through its more effective use by plants (Schiavon et al., 2020).

Consequently, when local food supply and security increases, citizens concern for food quality and environmental safety can be addressed by explaining the novel rationale of production. Overall, this will help to generate a sustainable income situation and increased productivity at the farm level, by using amendments of low cost (Datnoff and Rodrigues, 2005), that in principle reduce the use of pesticides, on land that had been set-aside. Many approaches have tried to qualitatively and quantitatively describe soil and site quality, and to translate soil fertility to land users and owners. Soil fertility is the capacity to support plant growth. It is the component of overall soil productivity that deals with available nutrient status, and its ability to provide nutrients out of its own reserves and through external applications for crop production. There are three main components of soil fertility: Physical, chemical and biological. The level of soil fertility results from the inherent characteristics of the soil and the interactions that occur between these three components during crop management. Thus, discussions based on field data are needed to better understand the real potential of marginal lands (Blanco-Canqui, 2016) and options of phytomanagement to improve ecosystem services and opportunities

of using this land for non-food production (Burgess et al., 2018). Most of the time, indicators have been defined that serve to standardize a certain status before or after a measure (Schröder et al., 2019). Improvement of sites, and movement towards circular economy can eventually be characterized by factors of soil multi-functionality to support the sustainable use of soil resources (Greiner et al., 2017) and other indicators (Drobnik et al., 2018), that ideally derive from discussions with farmers, stakeholders, and agronomists (Table 1).

7. Outlook

With view to the increasing land use conflicts, it will be of high importance to achieve common strategies to respond to global change issues of high public concern such as food, feed and fiber plants. In addition to the sustainability aspect, cost effectiveness, reliability, long-term sustainability, resilience and reasonable input of resources are characteristics of this approach that is exploiting well established as well as new technologies. Derived from indicator networks like those described above (or more elaborate ones) and from available computerized measurements, a practical toolbox addressing resilient agricultural systems should become available as an end-product,

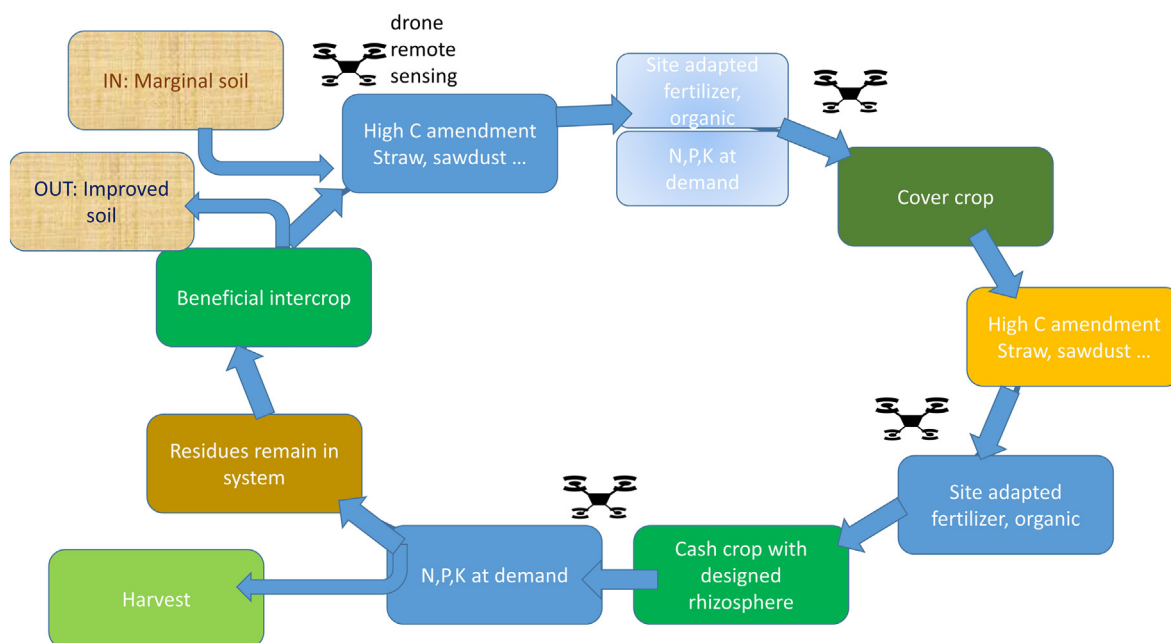


Fig. 7. Food, fodder and biomass production on re-installed soils with limited productivity. After thorough analysis, essential soil processes will be re-activated by crop rotation with favourable combinations, and by amendments of compost or green manure derived material that can be applied in a precise manner, e.g. as pellets, for that, farm residues will be incorporated to initiate soil formation; biochar, biofortifying elements and manure. In consequence, water retention will be enhanced. Future directions: select crops with special endophytes and initiate resilient rhizosphere communities.

describing sustainable intensification of agriculture under increasing stress of climate change, with a recommendation of which crop rotation to use, which amendments to apply and how to preserve biodiversity and ecosystem services, translated to national languages and distributed to farmers and stakeholders (Fig. 7). In this context, it is important to bridge the contrasting expectations connected to the use of marginal lands, to avoid the costly price of hype, overselling and disillusionment. Practitioner's involvement is of utmost importance to build constructive engagement that bases on scientific facts of soil functioning, including constant oscillation between present and future results, between present problems and future solutions. It is important to point out the underlying longer-term value of soil recovery and to attenuate unrealistic or impracticable short-term expectations (Brown, 2003).

Thus, a second, more ecology-driven toolbox with a set of advanced methods to characterize the microbiota and nutrient turnover should be produced, describing new pests and disease outbreaks and other environmental pressures, and how to improve plant health by inoculating with beneficial microbes. Such a toolbox is fundamental to forecasting the incentives and obligations that will be necessary to mobilize the necessary resources for a particular measure to be realised in the field situation.

As research agendas and data sets mature, it can also be expected that novel agro-ecology and climate problems will become more apparent and need to be solved. Much of the initial momentum and investment might still be utilized in terms of general soil improvement measures, and niche applications, which in the medium term will not entirely substitute present ways of doing and thinking about crop and soil management. In the end, good parts of valuable land would be ready for an improved new use. Perhaps grasses would be established for pasture, biomass plants would thrive, specialty crops would be cultivated or short coppice perennials would have already gained several years of growth. Overall, the system would focus on smarter agricultural management based on enhanced nutrient efficiency and resistance to pests/pathogens combined with a greener footprint. Any of these would be a great way of utilizing neglected land and transitioning it into gentle production.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgement

All authors are partners in the BioFoodOnMars Project funded by the EU-FACCE-SURPLUS within the FACCE-JPI. Authors are grateful for the financial support obtained from the national funding organizations, and for the support by the FACCE-office.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149844>.

References

- Alfthan, G., Euroala, M., Ekholm, P., Venäläinen, E.-R., Root, T., Korkalainen, K., Hartikainen, H., Salminen, P., Hietaniemi, V., Asplä, P., Arofor, A., the Selenium Working Group, 2015. Effects of nationwide addition of selenium to fertilizers on foods, and animal and human health in Finland: from deficiency to optimal selenium status of the population. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 31, 42–147. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2014.04.009>.
- Bardgett, R.D., Caruso, T., 2020. Soil microbial community responses to climate extremes: resistance, resilience and transitions to alternative states. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. B Biol. Sci.* 16 (1794), 20190112. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0112>.
- Baveye, P.C., White, R.E., 2020. The “4p1000” initiative: a new name should be adopted. *Ambio* 49 (1), 361–362.
- Blanco-Canqui, H., 2016. Growing dedicated energy crops on marginal lands and ecosystem services. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 80, 845–858. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.03.0080>.
- Brough, L., Thomson, B.M., Skeaff, S.A., 2016. Revisiting the iodine global network's definition of iodine status by country. *Br. J. Nutr.* 115 (2), 374–376.
- Brown, N., 2003. Hope against hype – accountability in biopasts, presents and futures. *Sci. Stud.* 16 (2), 3–21.
- Bulgarelli, D., Schlaeppi, K., Spaepen, S., Van Themaat, E.V.L., Schulze-Lefert, P., 2013. Structure and functions of the bacterial microbiota of plants. *Annu. Rev. Plant Biol.* 64, 807–838.
- Burges, A., Alkorta, I., Epelde, L., Garbisu, C., 2018. From phytoremediation of soil contaminants to phytomanagement of ecosystem services in metal contaminated sites. *Int. J. Phytoremediat.* 20, 384–397. <https://doi.org/10.1080/10108010.2017.1365340>.
- Buturi, C.V., Mauro, R.P., Fogliano, V., Leonardi, C., Giuffrida, F., 2021. Mineral biofortification of vegetables as a tool to improve human diet. *Foods* 10 (2), 223. <https://doi.org/10.3390/foods10020223>.
- Cakmak, I., Kutman, B., 2018. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. *Eur. J. Soil Sci.* 69, 172–180. <https://doi.org/10.1111/ejss.12437>.
- Campbell, C.L., Noe, J.P., 1985. The spatial analysis of soilborne pathogens and root diseases. *Ann. Rev. Phytopathol.* 23, 129–148.
- Caruso, T., Chan, Y., Lacap, D., 2011. Stochastic and deterministic processes interact in the assembly of desert microbial communities on a global scale. *ISME J* 5, 1406–1413. <https://doi.org/10.1038/ismej.2011.21>.
- Cheshire, P., 1999. Cities in competition: articulating the gains from integration. *Urban Stud.* 36 (5–6), 843–864. <https://doi.org/10.1080/004208993240>.
- Colombo, C., Palumbo, G., He, J.Z., Pinton, R., Cesco, S., 2014. Review on iron availability in soil: interaction of Fe minerals, plants and microbes. *J. Soils Sediments* 1, 538–548. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0814-z>.
- Congreves, K.A., Vyn, R.J., Van Eerd, L.L., 2013. Evaluation of post-harvest organic carbon amendments as a strategy to minimize nitrogen losses in corn crop production. *Agronomy* 3 (1), 181–199.
- Connolly, E.L., Guerinot, M.L., 2002. Iron stress in plants. *Genome Biol.* 3, 1024.1–1024.4.
- Connorton, J.M., Balk, J., 2019. Iron biofortification of staple crops: lessons and challenges in plant genetics. *Plant Cell Physiol.* 60 (7), 1447–1456. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcz079>.
- Constantin, J., Raynal, H., Casellas, E., Hoffman, H., Bindi, M., Doro, L., Eckersten, H., Gaiser, T., Grosz, B., Haas, E., Kersebaum, K., Klatt, S., Kuhnert, M., Lewan, E., Maharjan, G., Moriondo, M., Nendel, C., Roggero, P., Specka, X., Trombi, G., Villa, A., Wang, E., Weihermueller, L., Yeluripati, J., Zhao, Z., Ewert, F., Berge, J., 2019. Management and spatial resolution effects on yield and water balance at regional scale in crop models. *Agric. For. Meteorol.* 275, 184–195.
- Coskun, T., Sloop, K.W., Loghin, C., Alsina-Fernandez, J., Urva, S., Bokvist, K.B., Haupt, A., 2018. LY3298176, a novel dual GIP and GLP-1 receptor agonist for the treatment of type 2 diabetes mellitus: from discovery to clinical proof of concept. *Mol. Metab.* 18, 3–14.
- Das, S., Jeong, S.T., Das, S., Kim, P.J., 2017. Composted cattle manure increases microbial activity and soil fertility more than composted swine manure in a submerged rice paddy. *Front. Microbiol.* 8, 1702.
- Datnoff, L.E., Rodrigues, F.A., 2005. The role of silicon in suppressing rice diseases. *APSnet Features-2005-0205*. <https://doi.org/10.1094/2005-0205>.
- Debona, D., Rodrigues, F.A., Datnoff, L.E., 2017. Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. *Annu. Rev. Phytopathol.* 55, 85–107.
- Agriculture 4.0. The future of farming technology. In: DeClerq, M., Vats, A., Biele, A. (Eds.), *Proceedings of the World Government Summit*, Dubai, UAE.
- Dhankher, O.P., Foyer, C.H., 2018. Climate resilient crops for improving global food security and safety. *Plant Cell Environ.* 41, 877–884. <https://doi.org/10.1111/pce.13207>.
- Dimkpa, C.O., Bindraban, P.S., 2016. Fortification of micronutrients for efficient agronomic production: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 36 (1), 7. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0346-6>.
- Domene, X., 2016. Chapter 11 - A critical analysis of meso- and macrofauna effects following biochar supplementation. In: Ralebitso, T., Komang, Orr, C.H. (Eds.), *Biochar Application*. Elsevier, pp. 268–292.
- Drechsel, P., Heffer, P., Magen, H., Mikkelsen, R., Wichelns, D. (Eds.), 2015. *Managing Water and Fertilizer for Sustainable Agricultural Intensification*. First edition International Fertilizer Industry Association (IFA), International Water Management Institute (IWMI), International Plant Nutrition Institute (IPNI), and International Potash Institute (IPI), Paris, France.
- Drobnik, T., Greiner, L., Keller, A., Grêt-Regamey, A., 2018. Soil quality indicators – from soil functions to ecosystem services. *Ecol. Indic.* 94 (1), 151–169.
- Duborská, E., Urik, M., Šeda, M., 2020. Iodine biofortification of vegetables could improve iodine supplementation status. *Agronomy* 10 (10), 1574.
- Ekman, J., Goldwater, A., Bradbury, M., Matthews, J., Rogers, G., 2021. Persistence of human pathogens in manure-amended Australian soils used for production of leafy vegetables. *Agriculture* 11 (1), 14. <https://doi.org/10.3390/agriculture11010014>.
- Esmailzadeh-Salestani, K., Bahrām, M., Ghanbari Moheb Seraj, R., Gohar, D., Tohidfar, M., Eremeev, V., Talgre, L., Khaleghdoust, B., Mirmajlessi, S.M., Luik, A., Loit, E., 2021. Cropping systems with higher organic carbon promote soil microbial diversity. *Agric. Ecosyst. Environ.* 319, 107521. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107521>.
- Evers, B.J., Blanco-Canqui, H., Staggengborg, S.A., Tatarko, J., 2013. Dedicated bioenergy crop impacts on soil wind erodibility and organic carbon in Kansas. *Agron. J.* 105 (5), 1271–1276.
- Fan, M.-S., Zhao, F.-J., Fairweather-Tait, S.J., Poulton, P.R., Dunham, S.J., McGrath, S.P., 2008. Evidence of decreasing mineral density in wheat grain over the last 160 years. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 22, 315–324. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.11.012>.
- FAO, 2017. *The Future of Food and Agriculture – Trends and Challenges*. Rome.

- Felipe-Lucia, M.R., Soliveres, S., Penone, C., Fischer, M., Ammer, C., Boch, S., Boeddinghaus, R.S., Bonkowski, M., Buscot, F., Fiore-Donno, A.M., Frank, K., Goldmann, K., Gossner, M.M., Hölzel, N., Jochum, M., Kandeler, E., Klaus, V.H., Kleinebecker, T., Leimer, S., Manning, P., Oelmann, Y., Saiz, H., Schall, P., Schlöter, M., Schöning, I., Schrumpp, M., Solly, E.F., Stempfhuber, B., Weisser, W.W., Wilcke, W., Wubet, T., Allan, E., 2020. Land-use intensity alters networks between biodiversity, ecosystem functions, and services. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 117, 28140–28149.
- Foley, J.K., Michaux, K.D., Mudyahoto, B., Kyazike, L., Cherian, B., Kalejaiye, O., Ifeoma, O., Ilona, P., Reinberg, C., Mavindidze, D., Boy, E., 2021. Scaling up delivery of biofortified staple food crops globally: paths to nourishing millions. *Food Nutr. Bull.* <https://doi.org/10.1177/0379572120982501>.
- Follett, R.F., 2001. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil Tillage Res.* 61, 77–92. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00180-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00180-5).
- Fuge, R., Johnson, C.C., 2015. Iodine and human health, the role of environmental geochemistry and diet, a review. *Appl. Geochem.* 63, 282–302. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.09.013>.
- Garg, M., Sharma, N., Sharma, S., Kapoor, P., Kumar, A., Chunduri, V., Arora, P., 2018. Biofortified crops generated by breeding, agronomy, and transgenic approaches are improving lives of millions of people around the world. *Front. Nutr.* 5, 12. <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00012>.
- Garlaschelli, D., Caldarelli, G., Pietronero, L., 2003. Universal scaling relations in food webs. *Nature* 423, 165–168.
- Garousi, F., 2017. Toxicity of selenium, application of selenium in fertilizers, selenium treatment of seeds, and selenium in edible parts of plants. *Acta Univ. Sapientiae, Alimentaria* 10, 61–74. <https://doi.org/10.1515/ausal-2017-0004>.
- Gebhart, D.L., Johnson, H.B., Mayeux, H.S., Polley, H.W., 1994. The CRP increases soil organic carbon. *J. Soil Water Conserv.* 49 (5), 488–492.
- Gebremichael, M.T., Ranasinghe, A., Hosseini, P.S., Laboan, B., Sonneveld, E., Pipan, M., Oni, F.E., Montemurro, F., Höfte, M., Sleutel, S., De Neve, S., 2020. How do novel and conventional Agri-food wastes, co-products and by-products improve soil functions and soil quality? *Waste Manag.* 113, 132–144. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.040>.
- Gombart, A.F., Pierre, A., Maggini, S., 2020. A review of micronutrients and the immune system—Working in harmony to reduce the risk of infection. *Nutrients* 12, 236–277. <https://doi.org/10.3390/nu12010236>.
- Gontard, N., Sonesson, U., Birkved, M., Majone, M., Bolzonella, D., Celli, A., Angellier-Coussy, H., Jang, G.W., Verniquet, A., Broeze, J., Schaer, B., Batista, A.P., Sebok, A., 2018. A research challenge vision regarding management of agricultural waste in a circular bio-based economy. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 48, 614–654. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1471957>.
- Greiner, L., Keller, A., Grêt-Regamey, A., Papritz, A., 2017. Soil function assessment: review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services. *Land Use Policy* 69, 224–237.
- Guimarães, D.V., Gonzaga, M.I.S., da Silva, T.O., da Silva, T.L., da Silva, Dias N., Matias, M.I.S., 2013. Soil organic matter pools and carbon fractions in soil under different land uses. *Soil Tillage Res.* 126, 177–182.
- Gupta, M., Gupta, S., 2017. An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. *Front. Plant Sci.* 7, 2074. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.0207>.
- Hartikainen, H., 2005. Biogeochemistry of selenium and its impact on food chain quality and human health. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 18 (4), 309–318.
- Hasan, K.M.M., Sarkar, G., Alamgir, M., Bari, Q.H., Haedrich, G., 2012. Study on the quality and stability of compost through a demo compost plant. *Waste Manag.* 32, 2046–2055.
- Hayat, R., Ali, S., Amara, U., Khalid, R., Ahmed, I., 2010. Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. *Ann. Microbiol.* 60 (4), 579–598.
- Iqbal, H.M.N., Asgher, M., Bhatti, H.N., 2011. Optimization of physical and nutritional factors for synthesis of lignin degrading enzymes by a novel strain of *trametes versicolor*. *Bioresources* 6 (2), 1273–1287.
- Jacobs, E.T., Lance, P., Mandarino, L.J., Ellis, N.A., Sherry Chow, H.-H., Foote, J., Martinez, J.A., Paul Hsu, C.H., Batai, K., Saboda, K., Thompson, P.A., 2019. Selenium supplementation and insulin resistance in a randomized, clinical trial. *BMJ Open Diabetes Res. Care* 7, e000613. <https://doi.org/10.1136/bmjdr-2018-00061>.
- Jones, G.D., Droz, B., Greve, P., Gottschalk, P., Poffet, D., SP, McGrathe, Seneviratne, S.I., Smith, P., LHE, Winkel, 2017. Selenium deficiency risk predicted to increase under future climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114, 2848–2853. <https://doi.org/10.1073/pnas.1611576114>.
- Kamau, C.W., van Duijn, R., Schmid, C.A.O., Balazs, H.E., Roy, J., Rillig, M., Schröder, P., Radl, V., Temperton, V.M., Schlöter, M., 2021. Impact of high carbon amendments and pre-crops on soil bacterial communities. *Biol. Fertil. Soils* 57, 305–317. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01526-0>.
- Kambe, T., Tsuji, T., Hashimoto, A., Itsumura, N., 2014. The physiological, biochemical, and molecular roles of zinc transporters in zinc homeostasis and metabolism. *Physiol. Rev.* 95, 749–784. <https://doi.org/10.1152/physrev.00035.2014>.
- Kang, S., Post, W.M., Nichols, J.A., Wang, D., West, T.O., Bandaru, V., Izaurralde, R.C., 2013. Marginal lands: concept, assessment and management. *J. Agric. Sci.* 5 (5), 129–139. <https://doi.org/10.5539/jas.v5n5p129>.
- Kang, L., Fan, B., Chen, S., Chen, Q., 2018. Fertilization combined with catch crop maximize vegetable yield and minimize N and P surplus. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 112 (1), 87–99.
- Kazlauskaitė-Jadzevici, A., Tripolskaja, L., Volungevicius, J., Baksiene, E., 2020. Which land use is better suited to increase the fertility of ex-arable sandy soils? *Zemdirbyste-Agriculture* 107 (3), 203–208. <https://doi.org/10.13080/z-a.2020.107.026>.
- Krustev, S., Angelova, V., Zaprianova, P., 2019. Selenium content in agricultural soils and wheat from the Balkan peninsula. *Int. J. Agric. Biosyst. Eng.* 13 (9), 229–232.
- Liu, D., Liu, Y., Zhang, W., Chen, X., Zou, C., 2017. Agronomic approach of zinc biofortification can increase zinc bioavailability in wheat flour and thereby reduce zinc deficiency in humans. *Nutrients* 9 (5), 465. <https://doi.org/10.3390/nu9050465>.
- Lopes, G., Ávila, F.W., Guilherme, L.R.G., 2017. Selenium behavior in the soil environment and its implication for human health. *Cienc. Agrotecnol.* 41 (6), 605–615. <https://doi.org/10.1590/1413-70542017416000517>.
- Malusá, E., Sas-Pasz, L., Ciesielska, J., 2012. Technologies for beneficial microorganisms inocula used as biofertilizers. *Sci. World J.* 491206.
- Marmiroli, M., Bonas, U., Imperiale, D., Lencioni, G., Mussi, F., Marmiroli, N., Maestri, E., 2018. Structural and functional features of chars from different biomasses as potential plant amendments. *Front. Plant Sci.* 9, 1119.
- Martin, V., Bettencourt, A., 2018. Bone regeneration: biomaterials as local delivery systems with improved osteoinductive properties. *Mater. Sci. Eng. C* 82, 363–371.
- Mehdi, Y., Hornick, J.L., Istasse, L., Dufrasne, I., 2013. Selenium in the environment, metabolism and involvement in body functions. *Molecules* 18 (3), 3292–3311.
- Mensink, G., Fletcher, R., Gurinovic, M., Huybrechts, I., Lafay, L., Serra-Majem, L., Szponar, L., Tetens, I., Verkaik-Kloosterman, J., Baka, A., Stephen, A.M., 2013. Mapping low intake of micronutrients across Europe. *Br. J. Nutr.* 110, 755–773. <https://doi.org/10.1017/S000711451200565X>.
- Mi, J., Liu, W., Yang, W., Yan, J., Li, J., Sang, T., 2014. Carbon sequestration by *Miscanthus* energy crops plantations in a broad range semi-arid marginal land in China. *Sci. Total Environ.* (ISSN: 0048-9697) 496, 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.047>.
- Millán, R., Schröder, P., Sæbø, A., 2019. Editorial: options for transition of land towards intensive and sustainable agricultural systems. *Front. Plant Sci.* 10, 346. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00346>.
- Minasny, B., Malone, B.P., AB, McBratney, Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.S., Cheng, K., Das, B.S., Field, D.J., Gimona, A., Hedley, C.B., Hong, S.Y., Mandal, B., Marchant, B.P., Martin, M., BP, McConkey, Mulder, V.L., O'Rourke, S., Richer-de-Forges, A.C., Odeh, I., Padarian, J.C., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C.C., Vaygen, T.G., van Wesemael, B., Winowiecki, L., 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* (ISSN: 0016-7061) 292, 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>.
- Munkvold, L., Kjoller, R., Vestberg, M., Rosendahl, S., Jakobsen, I., 2004. High functional diversity within species of arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytol.* 164 (2), 357–364.
- Nabel, M., Schrey, S.D., Poorter, H., Koller, R., Jablonowski, N.D., 2017. Effects of digestate fertilization on *Sida hermaphrodita*: boosting biomass yields on marginal soils by increasing soil fertility. *Biomass Bioenergy* 107, 207–213.
- Nannipieri, P., Ascher-Jenull, J., Ceccherini, M.T., Pietramellara, G., Renella, G., Schlöter, M., 2020. Beyond microbial diversity for predicting soil functions: a mini review. *Pedosphere* 30, 5–17.
- Newton, A.C., Hodder, K., Cantarello, E., Perrella, L., Birch, J.C., Robins, J., Douglas, S., Moody, C., Cordingley, J., 2012. Cost-benefit analysis of ecological networks assessed through spatial analysis of ecosystem services. *J. Appl. Ecol.* 49, 571–580. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02140.x>.
- Nielsen, U.N., Ayres, E., Wall, D.H., Bardgett, R.D., 2011. Soil biodiversity and carbon cycling: a review and synthesis of studies examining diversity–function relationships. *Eur. J. Soil Sci.* 62 (1), 105–116.
- Novoselec, J., Klir, Z., Domacovic, M., Loncaric, Z., Antunovic, Z., 2018. Biofortification of feedstuffs with microelements in animal nutrition. *Poljoprivreda* 24, 25–34. <https://doi.org/10.18047/poljo.24.1.4>.
- Obermeier, M.M., Gnädinger, F., Obermeier, W.A., Balázs, H., Schröder, P., 2019. Effects of management practices on conversion of grassland to arable land in temperate climatic conditions. *Sci. Total Environ.* 703, 13549. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135494>.
- Ordóñez-Fernández, R., de Torres, M.A.R.R., Márquez-García, J., Moreno-García, M., Carbonell-Bojollo, R.M., 2018. Legumes used as cover crops to reduce fertilisation problems improving soil nitrate in an organic orchard. *Eur. J. Agron.* 95, 1–13.
- Palmgren, M.G., Clemens, S., Williams, L.E., Krämer, U., Borg, S., Schjørring, J.K., Sanders, D., 2008. Zinc biofortification of cereals: problems and solutions. *Trends Plant Sci.* 13 (9), 464–473.
- Pompano, L.M., Boy, E., 2021. Effects of dose and duration of zinc interventions on risk factors for type 2 diabetes and cardiovascular disease: a systematic review and meta-analysis. *Adv. Nutr.* 12 (1), 141–160.
- Rashid, A., Ryan, J., 2004. Micronutrient constraints to crop production in soils with Mediterranean-type characteristics: a review. *J. Plant Nutr.* 27, 959–975. <https://doi.org/10.1081/PLN-120037530>.
- Ravnskov, S., Larsen, J., 2016. Functional compatibility in cucumber mycorrhizas in terms of plant growth performance and foliar nutrient composition. *Plant Biol.* 18 (5), 816–823.
- Reichel, R., Wei, J., Islam, S.M., Schmid, C., Wissel, H., Schröder, P., Schlöter, M., Brüggemann, N., 2018. Potential of wheat straw, spruce sawdust, and lignin as high organic carbon soil amendments to improve agricultural nitrogen use efficiency and retention capacity. *Front. Plant Sci.* 9, 900. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00900>.
- Rengel, Z., 2015. Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 15 (2), 397–409. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162015005000036>.
- Rineau, F., Ladygina, N., 2013. *Biochar and Soil Biota*. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Rineau, F., Shah, F., Smits, M.M., Persson, P., Johansson, T., Carleer, R., Troein, C., Tunlid, A., 2013. Carbon availability triggers the decomposition of plant litter and assimilation of nitrogen by an ectomycorrhizal fungus. *ISME J.* 7, 2010–2022.
- Rose, D.C., Wheeler, R., Winter, M., Lobley, M., Chivers, C.A., 2021. Agriculture 4.0: Making it work for people, production, and the planet. *Land Use Policy* 100, 104933. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104933>.

- Ruotolo, R., Maestri, E., Pagano, L., Marmiroli, M., White, J.C., Marmiroli, N., 2018. Plant response to metal-containing engineered nanomaterials: an omics-based perspective. *Environ. Sci. Technol.* 52 (5), 2451–2467.
- Rutkowska, B., Szulc, W., Bonze, K., Gozdowski, D., Spychaj-Fabisiak, E., 2015. Soil factors affecting solubility and mobility of zinc in contaminated soils. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 12, 1687–1694. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0546-7>.
- Scheffers, B.R., De Meester, L., Bridge, T.C., Hoffmann, A.A., Pandolfi, J.M., Corlett, R.T., Watson, J.E., 2016. The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science* 354 (6313).
- Schiavon, M., Nardi, S., dalla Vecchia F., Ertani A., 2020. Selenium biofortification in the 21st century: status and challenges for healthy human nutrition. *Plant Soil* 453, 245–270. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04635-9>.
- Schimmelpenninck, D., 2017. Crop production costs, profits, and ecosystem stewardship with precision agriculture. *J. Agric. Appl. Econ.* <https://doi.org/10.1017/aae.2017.23> page 1 of 23.
- Schmer, M.R., Vogel, K.P., Mitchell, R.B., Dien, B.S., Jung, H.G., Casler, M.D., 2012. Temporal and spatial variation in switchgrass biomass composition and theoretical ethanol yield. *Agron. J.* 104 (1), 54–64.
- Schmid, C.A.O., Schröder, P., Armbruster, M., Schlöter, M., 2018. Organic fertilisation in a long-term field trial - consequences for the bulk soil microbiome as revealed by network analysis. *Microb. Ecol.* 76 (1), 226–239. <https://doi.org/10.1007/s00248-017-1110-z>.
- Schmid, C.A.O., Reichel, R., Schröder, P., Brüggemann, N., Schlöter, M., 2020. 52 years of ecological restoration following a major disturbance by opencast lignite mining does not resemble microbiome structures of the original arable soils. *Sci. Total Environ.* 745, 140955. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140955>.
- Schröder, P., 2008. Mesofauna. In: Schröder, P., Pfadenhauer, J., Munch, J.C. (Eds.), *Perspectives for Agroecosystem Management – Balancing Environmental and Socio-economic Demands*. Elsevier, Amsterdam, NL, pp. 293–303.
- Schröder, P., Beckers, B., Daniels, S., Gnädinger, F., Maestri, E., Marmiroli, N., Mench, M., Millan, R., Obermeier, M.M., Oustriere, N., Persson, T., Poschenrieder, C., Rineau, F., Rutkowska, B., Schmid, T., Szulc, W., Witters, N., Saebø, A., 2018. Intensify production, transform biomass to energy and novel goods and protect soils in Europe—a vision how to mobilize marginal lands. *Sci. Total Environ.* 616, 1101–1123.
- Schröder, P., Sauvêtre, A., Gnädinger, F., Pesaresi, P., Chmelikova, L., Dogan, N., Gerl, G., Gökçe, A., Hamel, C., Millan, R., Persson, T., Ravnskov, S., Rutkowska, B., Schmid, T., Szulc, W., Teodosiu, C., Terzi, V., 2019. Discussion paper: sustainable increase of crop production through improved technical strategies, breeding and adapted management. *Sci. Total Environ.* 678, 146–161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.212>.
- Shahzad, A., Ullah, S., Dar, A.A., Sardar, M.F., Mehmood, T., Tufail, M.A., Shakoar, A., Haris, M., 2021. Nexus on climate change: agriculture and possible solution to cope future climate change stresses. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 28 (12), 14211–14232. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12649-8>.
- Sheoran, A.S., Sheoran, V., Poonia, P., 2009. Phytomining: a review. *Miner. Eng.* 22, 1007–1019.
- Shortall, O.K., 2013. "Marginal land" for energy crops: Exploring definitions and embedded assumptions. *Energy Policy* 62, 19–27.
- Sinclair, A.H., Edwards, A.C., 2008. Micronutrient deficiency problems in agricultural crops in Europe. In: Alloway, B.J. (Ed.), *Micronutrient Deficiencies in Global Crop Production*. Springer, Dordrecht https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6860-7_9.
- Song, Z.L., Wang, H.L., Strong, P.J., Li, Z.M., Jiang, P.K., 2012. Plant impact on the coupled terrestrial biogeochemical cycles of silicon and carbon: implications for biogeochemical sequestration. *Earth Sci. Rev.* 155, 319–331. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.09.006>.
- Song, Z.L., Parr, J.F., Guo, F.S., 2013. Potential of global cropland phytolith carbon sink from optimization of cropping system and fertilization. *PLoS ONE* 8, 1–6. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073747>.
- Song, Z.L., Wang, H.L., Strong, P.J., Guo, F.S., 2014. Phytolith carbon sequestration in China's croplands. *Eur. J. Agron.* 53, 10–15. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.11.004>.
- Stocker, T. (Ed.), 2014. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Szulc, W., Rutkowska, B., Hoch, M., Spychaj-Fabisiak, E., Murawska, B., 2015. Exchangeable silicon content of soil in a long-term fertilization experiment. *Plant Soil Environ.* 61, 458–461. <https://doi.org/10.17221/438/2015-PSE>.
- Tarafder, C., Daizy, M., Alam, M.M., Ali, M.R., Islam, M.J., Islam, R., Ahommed, M.S., Aly Saad Aly, M., Khan, M.Z.H., 2020. Formulation of a hybrid nanofertilizer for slow and sustainable release of micronutrients. *ACS Omega* 5 (37), 23960–23966. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03233>.
- Tepes, A., Galarraga, I., Markandya, A., Sánchez, M.J.S., 2020. Costs and benefits of soil protection and sustainable land management practices in selected European countries: towards multidisciplinary insights. *Sci. Total Environ.* 756, 143925. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143925>.
- Thiele-Bruhn, S., Schlöter, M., Wilke, B.M., Beaudette, L.A., Martin-Laurent, F., Cheviron, N., Mougín, C., Römbke, J., 2020. Identification of new microbial functional standards for soil quality assessment. *Soil* 6, 17–34.
- Thorup-Kristensen, K., Halberg, N., Nicolaisen, M., Eivind Olesen, J., Crews, T.E., Hinsinger, P., Kierkegaard, J., Pierret, A., Bodin Dresbøll, D., 2020. Digging deeper for agricultural resources, the value of deep rooting. *Trends Plant Sci.* 25 (4), 406–417.
- Tolu, J., Thiry, Y., Bueno, M., Jolivet, C., Potin-Gautier, M., Le Hécho, I., 2014. Distribution and speciation of ambient selenium in contrasted soils, from mineral to organic rich. *Sci. Total Environ.* 479–480, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.079>.
- Trippé, R.C., Pilon-Smits, E.A.H., 2021. Selenium transport and metabolism in plants: phytoremediation and biofortification implications. *HazMat* 404 (Part B), 124178. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124178>.
- Turley, D., Taylor, M., Laybourn, R., Hughes, J., Kilpatrick, J., Procter, C., 2010. *Assessment of the Availability of Marginal and Idle Land for Bioenergy Crop Production*. p. 93 (London).
- Urrea, J., Alkorta, I., Garbisu, C., 2019. Potential benefits and risks for soil health derived from the use of organic amendments in agriculture. *Agronomy* 9, 542. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090542>.
- Vaculík, M., Lukacová, Z., Bokor, B., Martinka, M., Tripathi, D.K., Lux, A., 2020. Alleviation mechanisms of metal (loid) stress in plants by silicon: a review. *J. Exp. Bot.* 71 (21), 6744–6757.
- van Elsas, J.D., Chiurazzi, M., Mallon, C.A., Elhottova, D., Křišťufek, V., Salles, J.F., 2012. Microbial diversity determines the invasion of soil by a bacterial pathogen. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109 (4), 1159–1164.
- Viciedo, D.O., de Mello, Prado R., Toledo, R.L., dos Santos, L.C.N., Hurtado, A.C., Nedd, L.L.T., Gonzalez, L.C., 2019. Silicon supplementation alleviates ammonium toxicity in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 19 (2), 413–419.
- Vinceti, M., Filippini, T., Rothman, K.J., 2018. Selenium exposure and the risk of type 2 diabetes: a systematic review and meta-analysis. *Eur. J. Epidemiol.* 33 (9), 789–810. <https://doi.org/10.1007/s10654-018-0422-8>.
- Von Cossel, M., Lewandowski, I., Elbersen, B., Staritsky, I., Van Eupen, M., Iqbal, Y., Mantel, S., Scordia, D., Testa, G., Cosentino, S.L., Maliarenko, O., Eleftheriadis, I., Zanetti, F., Monti, A., Lazzina, D., Neimane, S., Lamy, I., Ciadamidaro, L., Sanz, M., Carrasco, J.E., Ciria, P., McCallum, I., Trindade, L.M., Van Loo, E.N., Elbersen, W., Fernando, A.L., Papazoglou, E.G., Alexopoulou, E., 2019. Marginal agricultural land low-input systems for biomass production. *Energies* 12, 3123. <https://doi.org/10.3390/en12163123>.
- Vorholt, J.A., Vogel, C., Carlström, C.I., Müller, D.B., 2017. Establishing causality: opportunities of synthetic communities for plant microbiome research. *Cell Host Microbe* 22 (2), 142–155.
- Vuko, M., Cania, B., Vogel, C., Kublik, S., Schlöter, M., Schulz, S., 2020. Shifts in reclamation management strategies shape the role of exopolysaccharide and lipopolysaccharide-producing bacteria during soil formation. *Microb. Biotechnol.* 13, 584–598.
- Watson, C.A., Öborn, I., Edwards, A.C., Dahlin, A.S., Eriksson, J., Lindström, B.E.M., Linse, L., Owens, K., Topp, C.F.E., Walker, R.L., 2012. Using soil and plant properties and farm management practices to improve the micronutrient composition of food and feed. *J. Geochem. Explor.* 121, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.jgexplo.2012.06.015>.
- Watteau, F., Dignac, M.-F., Bouchard, A., Revallier, A., Houot, S., 2018. Microplastic detection in soil amended with municipal solid waste composts as revealed by transmission electronic microscopy and pyrolysis/GC/MS. *Front. Sustain. Food Syst.* 2, 81.
- Wei, Z., Gu, Y., Friman, V.P., Kowalchuk, G.A., Xu, Y., Shen, Q., Jousset, A., 2019. Initial soil microbiome composition and functioning predetermine future plant health. *Sci. Adv.* 9 (9), eaaw0759.
- Welch, R., Graham, R., 2004. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective. *J. Exp. Bot.* 55, 353–634.
- Yachi, S., Loreau, M., 1999. Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: the insurance hypothesis. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 96 (4), 1463–1468.
- Zahedifar, M., 2020. Iron fractionation in the calcareous soils of different land uses as influenced by biochar. *Waste Biomass Valoriz.* 11, 2321–2330. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0481-9>.
- Zhang, X., Davidson, E.A., Mauzerall, D.L., Searchinger, T.D., Dumas, P., Shen, Y., 2015. Managing nitrogen for sustainable development. *Nature* 528 (7580), 51–59.
- Zhang, X., Song, Z., Hao, Q., Wang, Y., Ding, F., Song, A., 2019. Phytolith-occluded carbon storages in forest litter layers in southern China: implications for evaluation of long-term forest carbon budget. *Front. Plant Sci.* <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00581>.
- Zhao, B.Q., Li, X.Y., Liu, H., Wang, B.R., Zhu, P., Huang, S.M., So, H.B., 2011. Results from long-term fertilizer experiments in China: the risk of groundwater pollution by nitrate. *NJAS-Wageningen J. Life Sci.* 58 (3–4), 177–183.
- Zhu, Y., Gong, H., 2014. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 455472.
- Zhu, Z., Bai, Y., Lv, M., Tian, G., Zhang, X., Li, L., Jiang, Y., Ge, S., 2020. Soil fertility, microbial biomass, and microbial functional diversity responses to four years fertilization in an apple orchard in North China. *Hortic. Plant J.* 6, 223–230.
- Zou, C., Du, Y., Rashid, A., Ram, H., Savasli, E., Pieterse, P.J., Ortiz-Monasterio, I., Yazici, A., Kaur, C., Mahmood, K., Singh, S., Le Roux, M.R., Kuang, W., Onder, O., Kalayci, M., Cakmak, I., 2019. Simultaneous biofortification of wheat with zinc, iodine, selenium, and iron through foliar treatment of a micronutrient cocktail in six countries. *J. Agric. Food Chem.* 67, 8096–8106. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b01829>.
- Žydelis, R., Lazauskas, S., Volungevicius, J., Povilaitis, V., 2019. Effect of organic and mineral fertilisers on maize nitrogen nutrition indicators and grain yield. *Zemdirbyste-Agriculture* 106, 15–20. <https://doi.org/10.13080/z-a.2019.106.002>.