

VYTAUTO DIDŽIOJO UNIVERSITETAS
ŽEMĖS ŪKIO AKADEMIJA

TVIRTINU:

LEP VDU ŽŪA Kanclerė
Aušra Blinstrubienė
2025 m. lapkričio mėn. d.

**PROJEKTAS ĮGYVENDINTAS PAGAL ŽEMĖS ŪKIO MINISTERIJOS 2015–2023
METŲ TARPTAUTINIŲ MOKSLINIŲ TYRIMŲ IR TAIKOMOSIOS VEIKLOS
PROJEKTŲ ADMINISTRAVIMO TAISYKLES**

**DIRVOŽEMIO NAUDOJIMO POVEIKIS DIRVOŽEMIO ORGANINĖS
MEDŽIAGOS SAVYBĖMS IR ANGLIES SEKVESTRACIJAI (SOMPACS)**

2025 M. GALUTINĖ ATASKAITA

Tyrimo vadovas
Vaclovas Bogužas

Kaunas, Akademija
2025

TMTTV projekto

Dirvožemio naudojimo poveikis dirvožemio organinės medžiagos savybėms ir anglies sekvestracijai / Soil management effects on soil organic matter properties and carbon sequestration (SOMPACS)

Vykdytojai

Eilės Nr.	Vardas, pavardė	Institucija, pareigos
1.	Dr. Vaclovas Bogužas	Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademija, Agroekosistemų ir dirvožemio mokslų katedros profesorius
2.	Dr. Zita Kriauciūnienė	Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademija, Agroekosistemų ir dirvožemio mokslų katedros profesorė
3.	Dr. Aušra Marcinkevičienė	Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademija, Agroekosistemų ir dirvožemio mokslų katedros profesorė
4.	Dr. Rimantas Vaisvalavičius	Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademija, Agroekosistemų ir dirvožemio mokslų katedros docentas
5.	Dr. Vaida Steponavičienė	Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademija, Agroekosistemų ir dirvožemio mokslų katedros vyresnioji mokslo darbuotoja
6.	Dr. Lina Skinulienė	Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademija, Agroekosistemų ir dirvožemio mokslų katedros mokslo darbuotoja

TURINYS

SANTRAUKA	4
IVADAS	5
1. Naujausi pasiekimai tyrimų srityje	8
2. TYRIMŲ OBJEKTAS IR METODAI	10
2.1. Tyrimų sąlygos I ilgalaikiame lauko eksperimente	10
2.2. Tyrimų sąlygos II ilgalaikiame lauko eksperimente	12
2.3. Tyrimų metodai	14
3. TYRIMŲ REZULTATAI	15
3.1. I EKSPERIMENTAS: ŽEMĖS DIRBIMO IR TARPINIŲ PASĖLIŲ POVEIKIS DIRVOŽEMIO ORGANINĖS MEDŽIAGOS SAVYBĖMS IR ANGLIES SEKVESTRACIJAI	15
3.1.1. Dirvožemio fizikinės savybės	15
3.1.2. Dirvožemio agrocheminės savybės	17
3.1.3. Dirvožemio organinės medžiagos sankaupos ir stabilumas	21
3.1.4. Dirvožemio fermentų aktyvumas	27
3.1.5. Dirvožemio CO ₂ emisijos, temperatūra ir drėgmė	30
3.1.6. Augalų produktyvumas ir derlingumas	31
3.2. II EKSPERIMENTAS: SKIRTINGO TRĘŠIMO POVEIKIS DIRVOŽEMIO ORGANINĖS MEDŽIAGOS SAVYBĖMS IR ANGLIES SEKVESTRACIJAI	36
3.2.1. Dirvožemio fizikinės savybės	36
3.2.2. Dirvožemio agrocheminės savybės	38
3.2.3. Dirvožemio organinės medžiagos sankaupos ir stabilumas	41
3.2.4. Dirvožemio fermentų aktyvumas	50
3.2.5. Dirvožemio mikrobiotos pokyčiai	53
3.2.6. Dirvožemio CO ₂ emisijos, temperatūra ir drėgmė	64
3.2.7. Augalų produktyvumas ir derlingumas	67
IŠVADOS	72
REKOMENDACIJOS	74
NAUDOTOS LITERATŪROS SĄRAŠAS	76
PROJEKTO REZULTATŲ SKLAIDA 2022–2025 m.	81

Tarptautinių mokslinių tyrimų ir taikomosios veiklos (TMTTV) projekto SOMPACS tikslas – atskleisti tokias valdymo praktikas, kurių pagalba dirvožemiai būtų praturtinami organinės medžiagos sandėliais, atspariomis mikrobiologiniam skaidymui. Kiekvienas dirvožemis, net ir intensyviai bei ilgai tręšiamas organinėmis trąšomis, galiausiai pasiekia pusiausvyros būseną, kai dirvožemio organinės medžiagos (DOM) kiekis stabilizuojasi ir toliau nebedidėja. Tačiau, ši pusiausvyra priklauso ir nuo dirvožemio organinės medžiagos (DOM) kokybės, todėl bendras DOM kiekis gali būti padidintas gausinant labiausiai skaidymui atsparių organinių medžiagų sandėlius. Tyrimai taip pat skirti dirvožemio organinės anglies (C) balansui pasiekti, kurį galima optimizuoti taikant agrotechninius metodus, o taip pat – nustatyti DOM stabilumą priklausomai nuo ūkininkavimo sąlygų.

Šiuo tikslu tirti dirvožemio mėginiai iš aštuonių (tame tarpe iš dviejų VDU ŽŪA) ilgalaikių lauko eksperimentų su skirtingomis dirvožemio tvarkymo/naudojimo ir augalų auginimo sistemomis (įprastinis žemės dirbimas ir tiesioginė sėja dirvoje be žemės dirbimo (*no-till* technologija); tręšimas mineralinėmis ir organinėmis trąšomis; ūkininkavimas su ir be tarpinių pasėlių). Tyrimai atlikti skirtingose šalyse įrengtuose ilgalaikiuose lauko eksperimentuose: 22 metų (Lietuva); 26 metų (Italija); 30 metų (Lenkija, Airija); 46 metų (Lenkija); 54 metų (Lietuva); 100 metų (Lenkija) ir 178 metų Broadbalk eksperimentas (Jungtinė Karalystė).

Įvertintos pagrindinės dirvožemio savybės: granulimetrinė sudėtis, pH, bendroji organinė anglis (TOC), bendroji anglis (TC), bendrasis azotas (TN), bendrasis fosforas (TP), katijonų mainų talpa (CEC); rūgštingumas; augalams prieinami P, K, Mg. Naujausiais metodais pagrįstais tyrimais nustatyti ir kiti rodikliai: DOM sudėtis ir stabilumas naudojant pirolizės masių spektrometriją (Py-MS); įvairaus dydžio dirvožemio agregatų klasių išskyrimas ir skirtingo fizikinės-cheminės apsaugos lygio anglies (C) sandėlių nustatymas; mikrobiologinės savybės (dirvožemio mikroorganizmų bendrijų lygmens fiziologinis profiliavimas; funkciniai genai, dalyvaujantys C ir N apytakos cikluose; mikroorganizmų genetinė įvairovė); atskirtų DOM sandėlių $\delta^{13}\text{C}$ ir $\delta^{15}\text{N}$ analizė; dirvožemio biologinis aktyvumas; augalams prieinamos drėgmės kiekis ir dirvožemio hidrofobiškumo riba; dirvožemio molio frakcijos mineralinė sudėtis; dirvožemio struktūros stabilumas. Atspariausios DOM sandėlios – huminas – išskirtas skirtingais metodais (ekstrakcija ir atskyrimas stabilioje būsenoje) ir tirta jo cheminė sudėtis bei struktūra, taikant spektrometrinius ir spektroskopinius metodus (masės spektrometrija, NMR, FTIR, EPR, UV-Vis-NIR, fluorescencija). Įvertintos C atsargos dirvožemyje ir nustatytas šaltu vandeniu ekstrahuojamas C, kad būtų galima įvertinti galimą C išplovimą ir prieinamumą mikroorganizmams. Iš dirvožemio išsiskiriančio CO_2 kiekis tiesiogiai matuotas lauko sąlygomis. Visuose lauko eksperimentuose nustatytas augalų produktyvumas.

VDU Žemės ūkio akademijoje atlikti tyrimai leidžia praplėsti žinias, siekiant geriau suprasti DOM transformacijos procesus, ypatingą dėmesį skiriant mikroorganizmų skaidymui atspariausių DOM sandėlių susidarymui. Gauti rezultatai padės pasirinkti veiksmingiausias su DOM kaupimu susijusias ariamos žemės kokybės valdymo sistemas, o tai pagerins dirvožemio sveikatą, o kai kuriais atvejais – ir produktyvumą. Gautų rezultatų taikymas leis padidinti derlingumą, užtikrinti tvarią žemės ūkio gamybą ir sveiką aplinką, o tai bus galima laikyti abipusiai naudingomis strategijomis klimatui, apsirūpinimui maistu, atsparių ekosistemų ir visuomenės gyvavimui. Be to, tai padės įvertinti C sekvestracijos potencialą viršutiniame dirvožemio sluoksnyje bei podirvyje (t. y., po ariamuju sluoksniu) ir galimybes padidinti DOM sandėlių rezervą.

SOMPACS projekto vykdymo metu parengtos rekomendacijos potencialiems naudotojams, kurių taikymas padės racionaliau naudoti žemės ūkio paskirties žemę ir didinti C sekvestraciją. Gauti rezultatai leis atidžiau išnagrinėti dirvožemio kokybės valdymo poveikį klimato kaitos švelninimui, bus naudingi kuriant politikos priemones bei instrumentus.

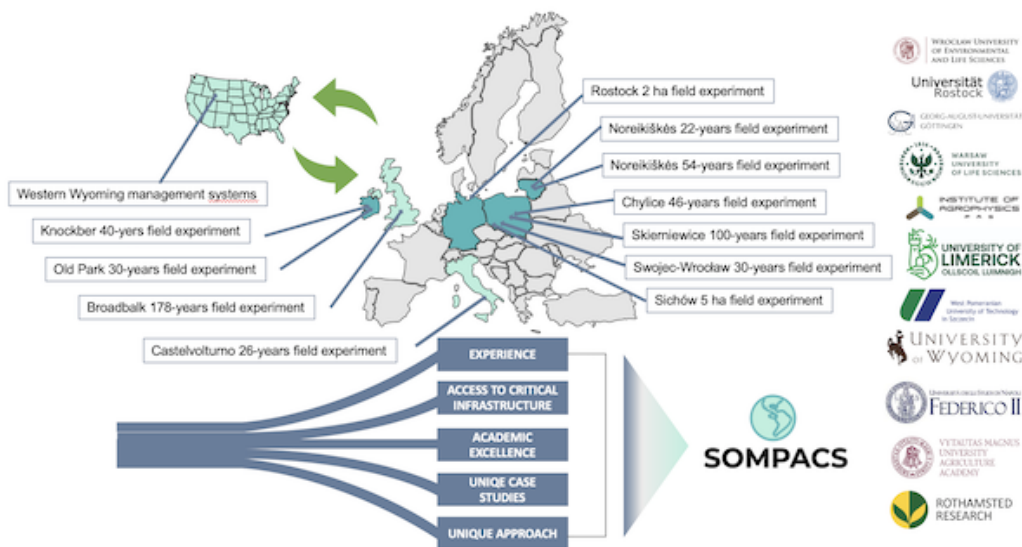
Reikšminiai žodžiai: dirvožemio kokybės valdymas, anglies sekvestracija, dirvožemio organinė medžiaga, fermentų aktyvumas, spektroskopinės savybės, dirvožemio organinės medžiagos sandėliai, tiesioginė sėja (*no-till* technologija), mineralinės ir organinės trąšos.

Veiksminga C sekvestracija gali padėti sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) kiekį, taip prisidedant prie Europos žaliojo kurso tikslo – užtikrinti poveikio klimatui neutralumą iki 2050 m. Todėl dirvožemio organinės medžiagos (DOM) kiekio didinimas tampa pagrindiniu uždaviniu Europos žemės ūkyje. Buvo imtasi įvairių politinių iniciatyvų C kiekiui dirvožemyje didinti, pavyzdžiui, Prancūzijos "4 per 1000" iniciatyva, tačiau dėl problemos sudėtingumo vis dar neaišku, kaip Europos ūkininkai ir/arba žemės naudotojai gali pasiekti šį tikslą. Pagrindinė problema yra ta, kad DOM kaupimosi ir transformacijos dirvožemyje procesai dar nėra iki galo išsiaiškinti.

Huminas – atspariausia (pastoviausia) DOM sandėkio dalis, prisidedanti prie dirvožemio organinės anglies atsargų didinimo, tačiau kita vertus – ir mažiausiai pažįstamas dirvožemio komponentas. Siekiant gauti naujos informacijos apie tvarų dirvožemio kokybės valdymą ir taip prisidėti prie DOM kiekių padidinimo reikalingi moksliniai tyrimai. Būtina gerai suprasti DOM transformacijos ir organinės anglies (C) sekvestracijos procesus. Dirvožemio praturtinimas organiniais komponentais turi tam tikrus apribojimus, nes kiekvienas dirvožemis, net ir daugelį metų tręšiamas organinėmis trąšomis, po tam tikro laiko pasiekia pusiausvyros būseną, kai DOM kiekis toliau nebedidėja. Tačiau, ši pusiausvyra iš dalies priklauso nuo DOM kokybės ir gali būti pakeista, pavyzdžiui, per dirvožemio kokybės valdymą ir organinės medžiagos sudėtį, jeigu DOM transformacija bus palanki formuoti mikrobiologiniam skaidymui atsparesnioms sandėkio dalims. Vis tik, norint pasinaudoti galimybe padidinti tokių medžiagų dalį reikia gerai suprasti jų struktūrą, chemines savybes ir transformacijos mechanizmus.

Tarptautinis mokslinių tyrimų ir taikomosios veiklos (TMTTV) projektas SOMPACS sudarė galimybes apjungti VDU Žemės ūkio akademijos ir skirtingų Europos ir kitų šalių mokslininkų turimas kompetencijas, patirtis bei įrangą tose šalyse vykdomų ilgalaikių (22–178 metų) lauko eksperimentų rezultatams įvertinti, naudojant vieningas metodikas ir taikant šiuolaikinius tyrimų metodus. Taip susiformavo unikalios galybės atlikti atspariausių ardymui DOM sandėkio komponento tyrimus, naudojant pažangius spektroskopinius metodus, suteikiančius naujų įžvalgų apie jo savybes ir struktūrą, įvertinti C atsargų dirvožemyje padidinimo galimybes ilgalaikėje perspektyvoje, taikant įvairius dirvožemio kokybės valdymo būdus.

Pagrindinis projekto tikslas – atskleisti dirvožemio naudojimo praktikas konkrečiose dirvožemio ir klimato sąlygose visoje Europoje, kurios gali padidinti dirvožemio organinės medžiagos kiekį, ypatingą dėmesį skiriant mikroorganizmų ardymui atsparioms organinės medžiagos (humino) sandėkio dalims tirti. Šiam tikslui pasiekti, SOMPACS projekto partneriai paėmė mėginius iš stacionarių ilgalaikių lauko eksperimentų (22 metų Lietuvoje; 26 metų Italijoje; 30 metų Lenkijoje ir Airijoje; 46 metų Lenkijoje; 54 metų Lietuvoje; 100 metų Lenkijoje, 178 metų Broadbalk eksperimento Jungtinėje Karalystėje) ir juos ištyrė savo laboratorijose (1.1 pav.). Eksperimentai apima skirtingo naudojimo dirvožemius, skirtingas augalų auginimo ir tręšimo sistemas, monopasėlius ir sėjomainas. Dirvožemiuose greta buvo tarpusavyje lyginama: tręšimas mineralinėmis ir organinėmis trąšomis; tradicinis ir neariminis žemės dirbimas bei tiesioginės sėjos (*no-till*) be žemės dirbimo technologija; ūkininkavimas su tarpiniais pasėliais ir be jų. Tokio pobūdžio tyrimai iki šiol dar nebuvo atlikti. Projektas taiko unikalų požiūrį tiriant dirvožemio kokybės valdymo ir naudojimo poveikį humino – stabiliausios DOM sudėtinės dalies (frakcijos) – kiekiui ir savybėms, įvertinant jo lemiamą vaidmenį C sekvestracijai ilguoju laikotarpiu. Dėl sunkumų, kylančių išskiriant huminą, mokslinės literatūros apie šią frakciją yra palyginti nedaug, o be to, ši frakcija niekada ir nebuvo tirta C sekvestracijos požiūriu ir žemės ūkio poveikio klimato kaitai kontekste. Be to, buvo vadovaujamas kelių metodų (*multi-method*) ir kelių dalyvių (*multi-actor approach*) požiūriu, kuris apjungia specifinę papildomą projekto partnerių patirtį ir kompetenciją pagrindinėse DOM mokslinių tyrimų srityse, o tai įprastiniuose tyrimuose atliekama gana retai.



1.1 pav. SOMPACS projekto ilgalaikių lauko eksperimentų vietos ir partneriai

SOMPACS projekto konsorciumą sudaro labai garsios žemės ūkio mokslinių tyrimų institucijos, kurios jau dešimtmečius specializuojasi DOM tyrimuose, o jų mokslinių tyrimų pasiekimai šioje srityje yra aukšto lygio. Taigi, jų bendras darbas projekte neabejotinai suteikia jam pridėtinės vertės. Visi konsorciumo nariai sudarė transeuropinį forumą, kuriame keičiamasi patirtimi, idėjomis ir atradimais, o tai įgalina mus dar geriau suprasti dirvožemio kokybės valdymo vaidmenį C sekvestracijos procese. Pasiiekti inovatyvūs rezultatai sukurs prielaidas naujoms nacionalinės ir regioninės politikos strategijoms kurti bei leis stiprinti ūkininkų bei politikos formuotojų gebėjimus.

SOMPACS projekto konsorciumo siekiamybė – gauti moksliskai pagrįstos informacijos apie dirvožemio kokybės valdymo įtaką labiausiai stabilių DOM sandraupų formavimuisi ir nustatyti geriausias žemės ūkio sistemas, užtikrinančias visą ekosisteminių paslaugų rinkinį, įskaitant C sekvestraciją. SOMPACS projektas praplės žinias apie DOM ir padės geriau suprasti DOM transformacijos procesus, ypatingą dėmesį skiriant atspariausios mikrobiniam skaidymui frakcijos susidarymui. Šiuo metu C sekvestracijos tyrimuose daugiausia dėmesio skiriama ir koncentruojamasi į tyrimus dirvožemio organinės anglies pokyčių lygmenyje. Todėl išsamus pasirinktų DOM sandraupų frakcijų spektroskopinių savybių tyrimas leis geriau suprasti DOM išliekamumą viršutiniame dirvožemio sluoksnyje ir podirvyje, taip pat nustatyti, kokia įvairių tipų žemės ūkio paskirties dirvožemių valdymo praktika prisideda prie stabilių DOM formų didinimo įvairiuose dirvožemiuose, o taip pat – pagerinant galimą C sekvestraciją ir sumažinant šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį.

Mūsų vizija – užpildyti esamas žinių spragas apie DOM transformacijos ir akumuliacijos procesus, naudojantis tiek vidiniais, tiek ir išoriniais šaltiniais, tam, kad būtų sukurtos prielaidos mikroorganizmų skaidymui atspariausių DOM sandraupų didinimui. TMTTV projekto vykdytojas Lietuvoje – Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademija – vykdė šias veiklas ir uždavinius:

1. Tęsė du ilgalaikius lauko eksperimentus – “Įprastinio bei nulinio žemės dirbimo bei su tarpiniais pasėliais poveikio tyrimai (nuo 2000 m.) ” ir “Kukurūzų ir rugių, auginamų 54 metus monopsėlyje be trąšų ir su mineralinėmis trąšomis bei sėjomainoje su mineralinėmis ir organinėmis trąšomis, ir juodojo pūdymo poveikio tyrimai”, kuriuose:

- tyrė pagrindines dirvožemio savybes ir augalų derlingumą,
- paėmė dirvožemio mėginius specifinės ir sudėtingos įrangos reikalaujantiems tyrimams atlikti partnerių institucijose, kurių Lietuvoje dėl įrangos stokos atlikti nebuvo galimybės.

2. Atliko CO₂ emisijų tyrimus Lietuvoje ir atrinktuose lauko eksperimentuose Lenkijoje.

3. Tyrė visų projekto partnerių dirvožemio fermentinį aktyvumą (ureazę, sacharazę).

4. Vadovavo 5-am projekto darbo paketui “Tręšimo ir dirvožemio naudojimo įtaka CO₂ emisijai iš dirvožemio” bei T1.3, T2.2, T2.8, T4.3, T5.1 ir T5.2 projekto uždaviniams.

5. Organizavo tarptautinę konferenciją Lietuvoje projekto tema.

6. Vykde projekto rezultatų sklaidą.

Geresnis dirvožemio organinės anglies patvarumo supratimas viršutiniame dirvožemio ir po juo esančiame (podirvio) sluoksniuose, o taip pat ir konkrečiai vietovei bei klimatui būdingų valdymo praktikų, mažinančių šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas, identifikavimas įgalins padidinti stabilias DOM sandaupas ir taip padidinti C sekvestracijos potencialą, prisidės prie dirvožemio sveikatos gerinimo. Papildomų naudų stebėjimas ir demonstravimas, tokių kaip padidėjęs derlingumas ir dirvožemio vandens sulaikymo geba, paskatins ūkininkų įsitraukimą ir įtikins juos taikyti rekomenduojamus sprendimus.

Dirvožemis yra didžiausias anglies (C) rezervuaras sausumos biosferoje, nes dirvožemyje yra net keturis kartus daugiau C nei visoje gyvojoje žemės medžiagoje kartu paėmus, todėl DOM pokyčiai dirvožemyje tiesiogiai veikia CO₂ koncentraciją atmosferoje (Kang ir kt., 2011). Vadinas, DOM kiekio didinimas yra labai pageidautinas procesas, nes jis gerina dirvožemio struktūrą, vandens sulaikymą ir maisto medžiagų atsargas, taigi, yra labai svarbus siekiant palaikyti ekosistemų funkcijas ir žemės ūkio produktyvumą. Derlingiausi pasaulio dirvožemiai jau ilgą laiką yra dirbami, todėl DOM juose gali būti išeikvotas, o jų derlingumas, dėl netvaraus naudojamo ir maisto medžiagų disbalanso, labai sumažėjęs (Lal, 2004a, 2004b). Be to, DOM nuostoliai didina CO₂ emisijas iš dirvožemio, todėl didėja CO₂ kiekis atmosferoje ir tuo būdu įtakojamas ateities klimatas (Davidson ir Janssens, 2006; Hicks Pries ir kt., 2017; Melillo ir kt., 2017). Kita vertus, C sekvestravimas dirvožemyje potencialiai gali pašalinti iš atmosferos nuo 0,79 iki 1,54 Gt C per metus (Fuss ir kt., 2018), taip prisidedant prie klimato stabilizavimo. Apskaičiuota, kad Airijos mineraliniai dirvožemiai gali sukaupti nuo 4 iki 15 t CO₂ ha⁻¹ per metus (Teagasc, 2020). Jeigu dirvožemio organinės anglies (DOA) kiekį kasmet pavyktų padidinti 0,4 %, tai galėtų sušvelninti padidėjusį CO₂ išmetimą, atsirandantį dėl žmogaus ūkinės veiklos. Taigi, dirvožemis potencialiai yra didžiulis CO₂ kaupėjas (Amelung ir kt., 2020). Tačiau Suomijos mokslininkų atliktas DOC sekvestracijos potencialo 2021-2040 m. prognostinis tyrimas parodė, kad dėl klimato kaitos DOA sekvestracija sumažės vidutiniškai 0,28 t C ha⁻¹ per metus⁻¹ ir 20 % didesnio C kiekio nepakaks, kad 2021-2040 m. būtų pasiektas 4 % tikslas (Tao ir kt., 2023).

Natūralus gamtinis dirvožemio organinės anglies lygis atspindi į dirvožemį patenkančio ir prarandamo C balansą, tačiau nebūtinai yra viršutinė dirvožemio C atsargų riba. Svarbus veiksnys, turintis įtakos C sekvestracijai, yra dirvožemio naudojimo ir dirbimo būdas (Assuncao ir kt., 2019; Di ir kt., 2018; Flowera ir kt., 2021; Ndzelu ir kt., 2021), nes tai gali įtakoti mineralizacijos ir humifikacijos procesų pusiausvyrą. Dirvožemio valdymo poveikis C atsargoms ir DOM savybėms priklauso nuo dirvožemio savybių, ypač vandens režimo, atsparumo vandeniui ir dirvožemio struktūringumo (Eden et al, 2017; Gregory ir kt., 2009; Minasny ir McBratney, 2018; Rawls ir kt., 2003; Williams ir kt., 2016). Netgi labili (t. y., nepatvari) DOM dalis stabiliuose mikroagregatuose gali būti veiksmingai apsaugota nuo greito irimo (Churchman, 2018; Six ir kt., 2004). Tyrimai, susiję su DOM transformacijomis, negali būti pilnai suprasti, neturint žinių apie molio mineralų sudėtį (Sarkar ir kt., 2018). Yra žinoma, kad dirvožemiuose, kuriuose dominuoja 2:1 grupės molio mineralai, susidaro didesnės dulkių ir molio frakcijose apsaugotos C sandaupos, lyginant su dirvožemiais, kuriuose dominuoja 1:1 grupės molio mineralai (Six ir kt., 2002). Diskusija apie skirtingų molio mineralų sąveiką su DOM vis dar tebevyksta (Kome ir kt., 2019), todėl norint išsiaiškinti mechanizmus, lemiančius dirvožemio agregatų ir DOM sandaupų (telkinių) stabilumą, reikia naujų tyrimų pažangiausiais metodais.

Norint tiksliai apibūdinti sudėtingą DOM molekulinę sudėtį, reikia turėti mokslškai gerai pagrįstų žinių apie DOM formavimąsi ir išsilaikymą (Acksel ir kt., 2016; Glaser, Amelung 2003; Haubold-Rosar ir kt., 2016). DOM yra neįtikėtinai sudėtingas darinys, o dešimtmečius trunkantys tyrimai parodė, kad negalime suprasti visų DOM sandaros aspektų, tyrinėdami ir modeliuodami jį tik kaip vieną ir vientisą darinį (Jenkinson, 1990; Parton ir kt., 1988; Trumbore, 2009). Visuotinai sutariama, kad DOM reikia suskirstyti į atskirus kontrastingos elgsenos komponentus (frakcijas), taip siekiant ištirti ir prognozuoti jo dinamiką.

Šiuo metu naudojamos kelios skirtingos DOM komponentų (frakcijų) atskyrimo schemas. Metodas, apibūdinamas kaip "Par-Den 5" (Poeplau ir kt., 2018), apjungia flotaciją (sodrinimą) ir šlapią sijojimą, gaunant mechaniškai skirtingų frakcijų seriją (2000-200 µm lengvosios ir tankiosios frakcijos; 200-50 µm frakcija ir < 50 µm frakcija). Dažniau yra naudojamas DOM atskyrimo į kietąsias daleles (POM) ir su mineralais susijusią organinę medžiagą (MAOM) metodas (Cotrufo ir kt., 2019; Haddix ir kt., 2020; Lavallee ir kt., 2020; Mikutta ir kt., 2019; Sokol ir kt., 2019). Kitas požiūris į organinės anglies dinamiką – dirvožemio struktūros ir dirvožemio gebėjimo stabilizuoti DOM ryšio tyrimas (Six ir kt., 2002). Jis grindžiamas keturiomis išmatuojamų sandaupų grupėmis: 1) biochemiškai apsaugotomis C sandaupomis, 2) dulkių ir

molio frakcijose apsaugotomis C sankaupomis, 3) mikroagregatuose apsaugotomis C sankaupomis ir 4) neapsaugotas C sankaupų kiekis. Biochemiškai apsaugotas C sankaupų kiekis keičiasi labai lėtai ir dažnai prilyginamas nehidrolizuojamai frakcijai.

Analizuojant C sekvestracijos galimybes, tradiciškai buvo vadovaujamasi aukščiau aprašytu DOM atskyrimo požiūriu, o metodai, pritaikyti tirti humines medžiagas (HS), nebuvo taikomi. Pastaruoju metu atsirado kritiškų vertinimų huminių medžiagų (HS) prigimtės ir jų išskyrimo procesų atžvilgiu (Lehmann ir Kleber 2015), teigiant, kad šarmais išskiriamos frakcijos yra netinkamos DOM struktūrai ir funkcijoms tirti. Tai yra diskutuotinas teiginys, sulaukiantis daugelio DOM tyrimais užsiimančių specialistų nepritarimo (De Nobili 2019; Hayes ir Swift 2020; Hayes ir kt., 2017; Myneni 2019; Olk ir kt., 2019a, 2019b). Visų pirma, yra manoma, kad humino, kaip labiausiai atspaus DOM sankaupų darinio (komponento), tyrimai gali suteikti naujos informacijos ir užpildyti esamų žinių spragas. Tai labai heterogeniškas DOM sankaupų darinys, o jo struktūra vis dar nėra iki galo išsiaiškinta (Hayes ir kt., 2017). Todėl naujausių pažangių spektroskopinių metodų (NMR, EPR, FTIR, UV-Vis, fluorescencijos, Py-GC/MS, N-XANES) taikymas cheminėms ir fizikinėms humino savybėms apibūdinti gali padėti geriau suprasti jo struktūrą ir savybes (Hayes ir kt., 2017; Mielnik ir kt., 2021; Liu ir Zhang 2019).

Huminas iki šiol buvo mažiausiai ištirtas DOM darinys, nors paprastai jis sudaro daugiau kaip pusę humusinių medžiagų (humuso) sudėties. Taip yra tikriausiai todėl, kad jis yra labai hidrofobiškas ir netirpus, esant bet kokioms pH reikšmėms, todėl jį išskirti labai sunku (Weber ir kt., 2021). Be to, huminas sudaro labai stabilus humino ir molio kompleksus su dirvožemio mineralais (Stevenson 1994), kurie negali būti suardyti humusinių medžiagų išskyrimo metu. Humino sankaupos yra ypač įdomios dėl savo hidrofobinės prigimtės ir gebėjimo sudaryti asociacijas. Todėl tikimasi, kad jis bus labai atsparus suirimui. Be to, pastaruoju metu paaiškėjo, kad huminas atlieka svarbų vaidmenį gerinant dirvožemio savybes ir C sekvestraciją atmosferoje (Hayes ir kt., 2017).

Yra žinoma, kad dėl ilgalaikio žemės dirbimo DOM degradoja panašiu mastu visame dirvožemio profilyje (Hayes ir kt., 2010). Toks praradimas labai prisideda prie didėjančio CO₂ kiekio atmosferoje. Todėl labai svarbu ištirti DOM pokyčius, įtakotus ilgalaikio žemės dirbimo, juos lyginant su procesais, vykstančiais gretimai esančiuose dirvožemiuose, kuriuose auga miškas ir/arba yra įrengtos pievos. Ilgalaikio dirvožemio valdymo poveikį bus galima ištirti Broadbalk Wheat eksperimente (Jungtinė Karalystė), kuris buvo pradėtas 1843 m. (Macdonald ir kt., 2018) ir yra seniausias tęstinis lauko eksperimentas pasaulyje.

Nors neariminė žemdirbystės sistema tausoja dirvožemį ir vandens atsargas bei mažina gamybos sąnaudas, tačiau jos DOC sekvestravimo potencialas priklauso nuo vietos sąlygų (Blanco-Canqui ir Lal, 2008). C kaupimasis priklauso nuo daugelio veiksnių, įskaitant dirvožemio struktūrą, drenažo sistemą, žemės naudojimą ir dirbimą, agroekosistemas ir klimato sąlygas. Ne visuomet neariminė žemdirbystės sistema gali padidinti C kaupimą, palyginti su arimu molinguose ir blogai drenuojamuose dirvožemiuose bei šalto klimato zonose. Retkarčiais arimo gali prireikti molinguose ir suslėgtuose dirvožemiuose, kad pagerėtų šaknų plitimas. Vien tik neariminis žemės dirbimas be papildomos praktikos, pvz. biomasę produkuojančių augalų, augalų liekanų mulčiavimo, sudėtingų sėjomainų (su ankštiniais augalais arba daugiametėmis žolėmis) ir tręšimo mėšlu, C sekvestracijai ir dirvožemio našumui didinti, gali būti ne ką geresnis, nei ariminis žemės dirbimas (Blanco-Canqui ir Lal, 2023).

Vienas svarbiausių dirvožemio derlingumo, biologinio aktyvumo indikatorių yra fermentų aktyvumas (Lee ir kt., 2020). Dirvožemio fermentai yra specifiniai baltymai, įvairių cheminių procesų ląstelėje katalizatoriai, kurie mikroorganizmams padeda pasisavinti netirpias medžiagas (Rao, 2017). Fermento sacharazės aktyvumas siejasi su organinės anglies apykaita dirvožemyje (Wang ir kt., 2020). Dirvožemio fermentas ureazė vaidina lemiamą vaidmenį azoto apykaitoje, o ureazės aktyvumo pakitimai gali būti naudojami kaip netiesioginis potencialiai prieinamo azoto kiekio dirvožemyje kitimo rodiklis (Farooq ir kt., 2021). Mokslininkų nustatytas ryšys tarp dirvožemio fermentų aktyvumo ir žemės ūkio augalų derliaus parodė, kad, spartėjant mikrobiologiniams procesams, vyksta intensyvi organinių medžiagų mineralizacija bei humifikacija, atsipalaiduoja daugiau augalams prieinamų maisto elementų. Taigi dėl šios

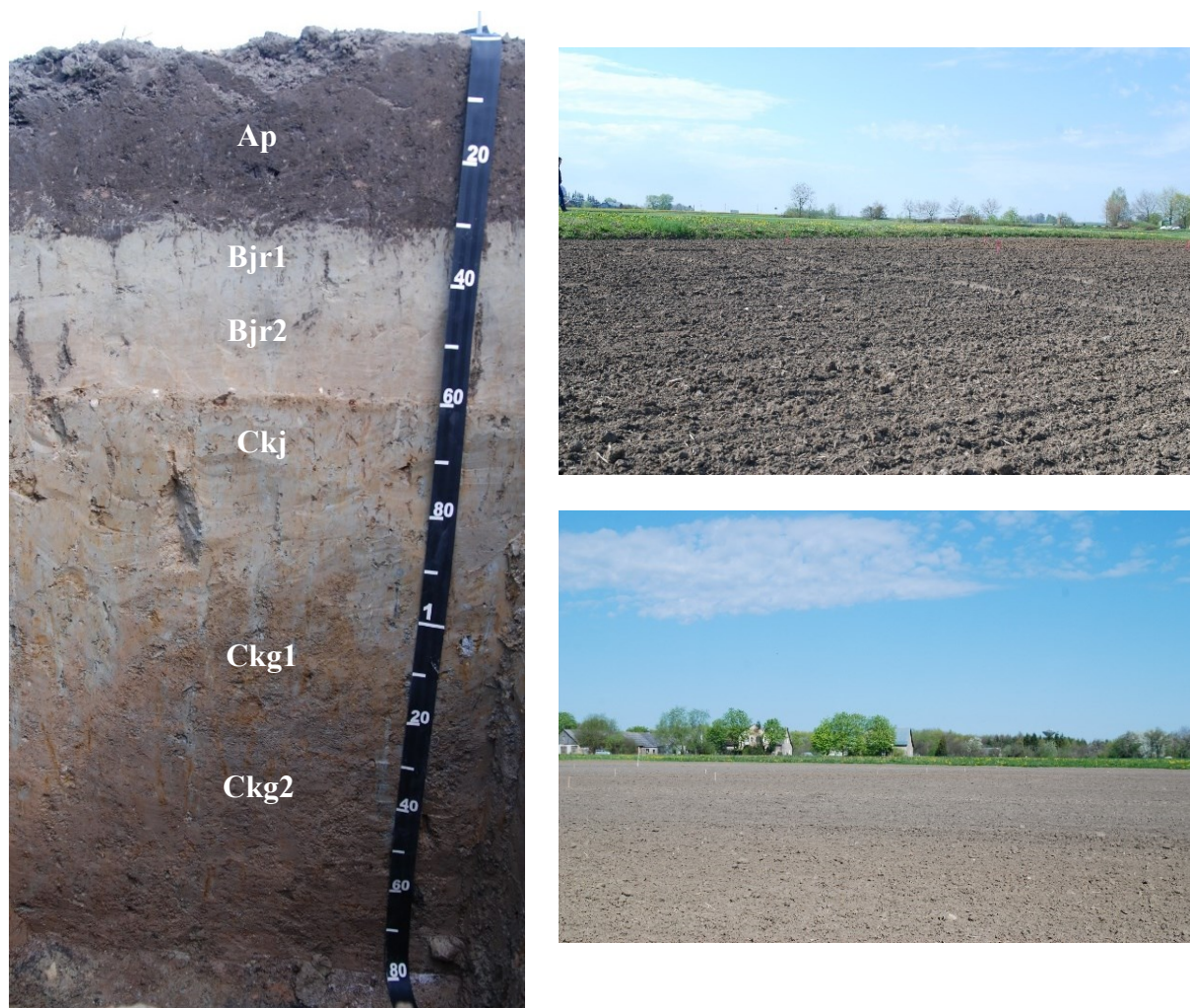
priežasties dirvožemio biologinis aktyvumas siejasi su sėjomainos augalų derliumi, humuso gausėjimu ir dirvožemio fizikinių savybių gerėjimu (Zhang ir kt., 2016). Dirvožemio fermentai yra glaudžiai susiję su dirvožemio fizikinėmis, cheminėmis ir biologinėmis savybėmis (Li ir kt., 2019). Taikydami tausojančiąsias ūkininkavimo sistemas, palikdami daugiau augalinių liekanų galime stimuliuoti fermentų aktyvumą dirvožemyje bei padidindami bendrąjį dirvožemio derlingumą (Nath ir kt., 2021). Daugelis autorių nurodo, kad tarpiniai pasėlių įterpimas į sėjomainas gerina dirvožemio kokybę bei didina fermentų aktyvumą (Ma ir kt., 2017; Rankoth ir kt., 2019; Tyler, 2020).

2. TYRIMŲ OBJEKTAS IR METODAI

Tyrimų teritorija yra Vidurio Lietuvos molingosios žemumos centrinėje dalyje, susiformavusioje viršutinio pleistoceno apledėjimo, Nemuno ledynmečio Baltijos stadijos Vidurio Lietuvos fazės metu. Jai būdingas karbonatingas (karbonatai išplauti vidutiniškai į 60 cm gylį), santykinai vienalytis moreninis priemolis, apklotas limnoglacialiniu smėliu. Foniniais gamtinių teritorijų (miškų) dirvožemiais čia laikytini išplautžemiai, tuo tarpu žemės ūkio naudmenų vyraujančiais dirvožemiais įvardijami rudžemiai, susiformavę dėl teritorijos agrogenizacijos – iškirtus miškus ir pasikeitus dirvožemių hidrologiniam režimui. Vis tik, VDU ŽŪA bandymų stoties dirvožemio danga yra pakankamai marga – čia galima aptikti bent keturis skirtingos genezės dirvožemių tipologinius vienetus, 1999 metų Lietuvos dirvožemių klasifikacijoje (LTDK–99) priskiriamus rudžemių (*Cambisols*), išplautžemių (*Luvisols*), palvažemių (*Planosols*) ir šlynžemių (*Gleysols*) grupėms.

2.1. Tyrimų sąlygos I ilgalaikiame lauko eksperimente

Stacionarus lauko eksperimentas įrengtas 2000 m. Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademijos Bandymų stotyje. Dirvožemis pagal LTDK–99 klasifikaciją yra giliau karbonatingas šlynžemis (2.1 pav.). Granulimetrinė dirvožemio sudėtis – lengvas priemolis ant vidutinio sunkumo bei sunkaus priemolio.



2.1 pav. Giliau karbonatingo šlynžemio profilis ir eksperimento vietos kraštovaizdis
(J. Volungevičiaus nuotraukos)

Dirvožemio armens (humusinio Ap horizonto) pH_{KCl} 6,0–6,7, jam būdingas didelis ir labai didelis fosforingumas (vidutiniškai $285,8 \text{ mg kg}^{-1}$) bei didelis kalingumas – $240,0 \text{ mg kg}^{-1}$. Šio eksperimento laukuose organinės anglies (C_{org}) kiekis svyravo nuo 1,11 iki 1,28 %, bendras azotas ($\text{N}_{\text{bendras}}$) – nuo 0,009 iki 0,110 %.

Ilgalaikis lauko eksperimentas įrengtas laukelių skaidymo metodu, 4 pakartojimais, iš viso 48 laukeliai. Laukelių dydis: pradinis – 102 m^2 (6 m x 17 m), apskaitinis – 30 m^2 (2,0 m x 15 m).

Šiame eksperimente taikoma sėjomaina: žieminiai rapsai, žieminiai kviečiai, vasariniai miežiai. 2022 m. auginti žieminiai rapsai, 2023 m. auginti žieminiai kviečiai. Vienoje eksperimento dalyje šiaudai pašalinti (–Š), o kitoje dalyje – susmulkinti ir paskleisti (+Š). Ir fone be šiaudų, ir fone su paskleistais šiaudais tiriamos 3 žemės dirbimo sistemos.

VEIKSNYS A: ŠIAUDAI

–Š – be šiaudų (kontrolė);

+Š – su šiaudais (šiaudai susmulkinti ir paskleisti).

VEIKSNYS B: ŽEMĖS DIRBIMO SISTEMOS

GA – gilus arimas (dirva skusta ir arta rudenį 23–25 cm gyliu, kontrolė);

TP – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais (nedirbtoje žemėje su tarpiniais pasėliais);

TS – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių (nedirbtoje žemėje be tarpinių pasėlių).

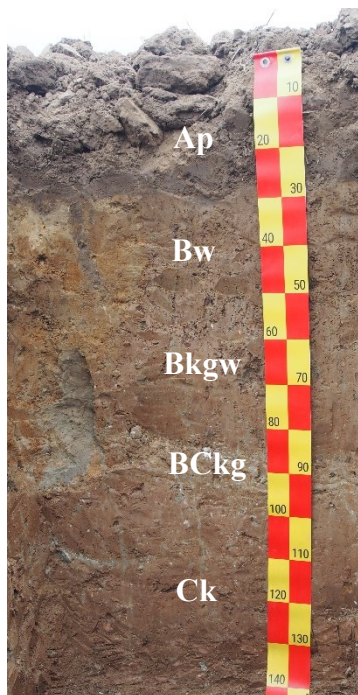
2.2. Tyrimų sąlygos II ilgalaikiame lauko eksperimente

II-as ilgalaikis stacionarus lauko eksperimentas įrengtas 1965 m., o tyrimai pradėti nuo 1967 m. prof. A. Stancevičiaus iniciatyva Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademijos Bandymų stotyje $54^{\circ}53'N + 23^{\circ}50'E$ (3 pav.).



2.2 pav. Sėjomainų kolekcija Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademijos Bandymų stotyje ($54^{\circ}53'N + 23^{\circ}50'E$).

Eksperimento vietos dirvožemis susiformavęs dugninės morenos arba dugninių ledynų darinių, padengtų limnoglacialinėmis nuosėdomis, srityje. Dirvožemis pagal LTDK–99 klasifikaciją yra giliau karbonatingas sekliai glėjiškas rudžemis (2.3 pav.). Vandens režimas sureguliuotas uždaru drenažu, mikroreljefas išlygintas. Dirvožemio ariamasis sluoksnis – 25 cm storio.



2.3 pav. Giliau karbonatingo sekiai glėjiško rudžemio profilis ir eksperimento vietos kraštovaizdis (*R. Vaisvalavičiaus nuotraukos*)

Dirvožemio kokybiniai ir augalų produktyvumo tyrimai atliekami sėjamojo rugio *Secale cereale* L. (žieminės formos) ir paprastojo kukurūzo – *Zea mays* L pasėliuose. Siekiant atspindėti Lietuvoje pastaruoju metu išsivyrąjančių netvaraus ūkininkavimo tendencijų poveikį, projekto tikslams pasirinkti šie monopasėlių variantai: kukurūzų monopasėlis be trąšų ir be herbicidų; kukurūzų monopasėlis su trąšomis ir herbicidais; rugių monopasėlis be trąšų ir be herbicidų; rugių monopasėlis su trąšomis ir herbicidais. Palyginimui su monopasėliais pasirinkta intensyvi sėjomaina, kur kukurūzai ir žieminiai rugiai auginami tiek tręšiant vien mineralinėmis trąšomis, tiek ir mineralinėmis bei organinėmis trąšomis kartu. Nuolatinis pūdymas, kuriame kultūriniai augalai neauginami, įrengtas siekiant įvertinti pūdyimų poveikį dirvožemio derlingumui.

Ilgalaikiame lauko eksperimente taikoma augalų kaita:

Rugių monopasėlis: 1. Rugiai nuo 1967 m.

Kukurūzų monopasėlis: 1. Kukurūzai nuo 1967 m.

Nuolatinis pūdymas: 1. Juodas pūdymas nuo 1967 m.

Intensyvi sėjomaina:

1. Daugiametės žolės I naudojimo metų
2. **Žieminiai rugiai** → žieminiai rapsai žaliajai trąšai
3. Bulvės → žieminiai rugiai žaliajam pašarui
4. **Kukurūzai**
5. Miežiai → baltoji garstyčia žaliajai trąšai
6. Vikių ir avižų mišinys žaliajam pašarui + dobilų motiejukų įsėlis.

Intensyvi sėjomaina, siekiant padidinti organinės medžiagos įnašą, maksimaliai prisotinta tarpiniais pasėliais, kartą per rotaciją tręšiama mėšlu 55 t ha^{-1} , joje laikomos organiką dirvožemyje gausinančios daugiamečių žolės, paliekami susmulkinti javų šiaudai.

Šiame eksperimente pradinis laukelių dydis – 182 m^2 , trys pakartojimai.

2.3. Tyrimų metodai

Abiejuose lauko eksperimentuose dirvožemio mėginiai paimti iš skirtingų gylių ir tyrimų tikslais padalinti SOMPACS partneriams. Visos dirvožemio savybės analizuojamos tose pačiose laboratorijose, kad būtų užtikrintas rezultatų palyginamumas. Vertinamos tokios pagrindinės dirvožemio savybės: granulimetrinė sudėtis, pH, bendroji organinė anglis (TOC), bendroji anglis (TC), bendrasis azotas (TN), bendrasis fosforas (TP), katijonų mainų talpa (CEC); rūgštingumas; augalams prieinami P, K, Mg. Naujausiais metodais pagrįstais tyrimais nustatomi ir kiti rodikliai: dirvožemio organinės medžiagos (DOM) sudėtis ir stabilumas naudojant pirolizės masių spektrometriją (Py-MS); įvairaus dydžio dirvožemio agregatų klasių išskyrimas ir skirtingo fizikinės-cheminės apsaugos lygio anglies (C) sancaupų nustatymas; mikrobiologinės savybės (dirvožemio mikroorganizmų bendrijų lygmens fiziologinis profiliavimas; funkciniai genai, dalyvaujantys C ir N apytakos cikluose; mikroorganizmų genetinė įvairovė); atskirtų DOM sancaupų $\delta^{13}\text{C}$ ir $\delta^{15}\text{N}$ analizė; dirvožemio biologinis aktyvumas; augalams prieinamos drėgmės kiekis ir dirvožemio hidrofobiškumo riba; dirvožemio molio frakcijos mineralinė sudėtis; dirvožemio struktūros stabilumas. Atspariausios DOM sancaupos (huminas) išskiriamos skirtingais metodais (ekstrakcija ir atskyrimas stabilioje būsenoje) ir tiriama jų cheminė sudėtis bei struktūra, taikant spektrometrinius ir spektroskopinius metodus (masės spektrometrija, NMR, FTIR, EPR, UV-Vis-NIR, fluorescencija), kuriuos yra įsisavinę SOMPACS projekto partnerių laboratorijos. Įvertinamos C atsargos dirvožemyje ir nustatomas šaltu vandeniu ekstrahuojamas C, kad būtų galima įvertinti galimą C išplovimą ir prieinamumą mikroorganizmams. Iš dirvožemio išsiskiriančio CO_2 kiekis tiesiogiai matuojamas lauko sąlygomis. Fermentų sacharazės ir ureazės tyrimams atlikti dirvožemio ėminiai paimti iš kiekvieno laukelio 15 vietų dirvožemio grąžtu 0–25 cm gyliu. Natūralaus drėgnumo ėminiai išdžiovinti pravertose dėžutėse laboratorijos temperatūroje, sumalti ir išsijoti per 1 mm sietą. Fermento sacharazės aktyvumas nustatomas titravimo būdu, naudojant Fellingio tirpalus. Fermento ureazės aktyvumas nustatomas spektrofotometrinio metodu, naudojant Neslerio reagentą (Chunderova, 1973). Abiejuose lauko eksperimentuose nustatytas augalų produktyvumas.

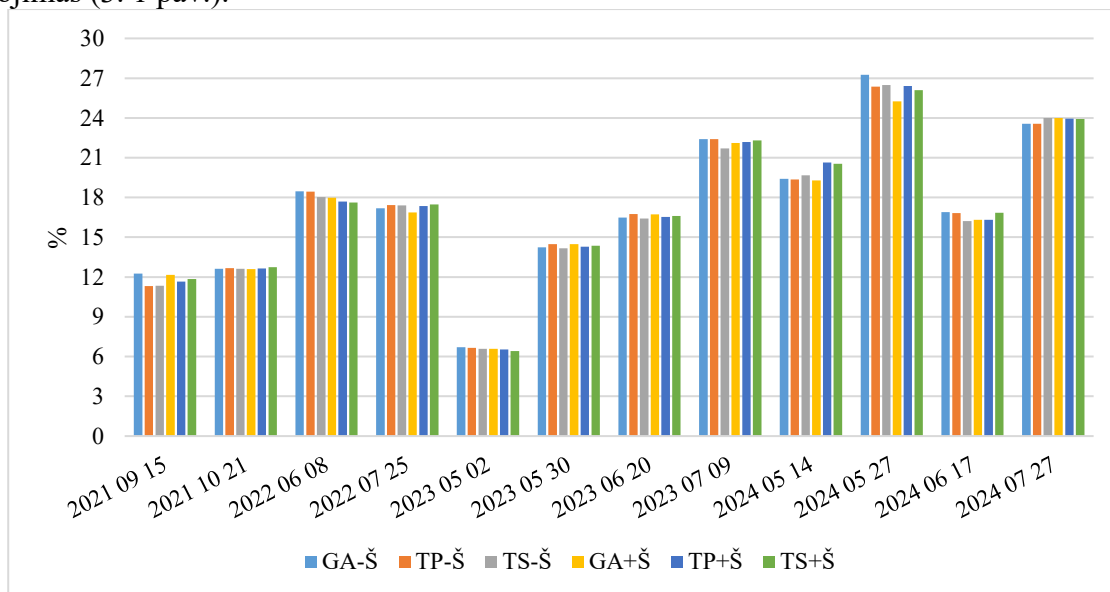
3. TYRIMŲ REZULTATAI

3.1. I EKSPERIMENTAS: ŽEMĖS DIRBIMO IR TARPINIŲ PASĖLIŲ POVEIKIS DIRVOŽEMIO ORGANINĖS MEDŽIAGOS SAVYBĖMS IR ANGLIES SEKVESTRACIJAI

3.1.1. Dirvožemio fizikinės savybės

Vandens kiekio išsaugojimas dirvožemyje ir augalų aprūpinimas drėgme jų augimo laikotarpiu aktualus ne tik sauso, bet ir vidutinio klimato zonoje (Tebrugge, 2001). Dirvožemio derlingumą nulemia ne tik vandens ir maisto medžiagų režimas jame, bet ir dirvožemio tipas, jo granulimetrinė sudėtis bei taikomos žemės dirbimo technologijos. Lietuvoje vis didėja ne tik žemdirbių, bet ir dalies visuomenės domėjimasis tausojančiomis žemdirbystės sistemomis. Jos ne tik supaprastina patį žemės dirbimą, taupo laiką bei energetinius resursus ir mažina išmetamųjų dujų kiekį, patenkantį į aplinką, bet ir turi įtakos dirvožemio fizikiniams procesams. Taikant supaprastintus žemės dirbimo būdus, keičiasi dirvožemio tankis, bendrasis ir aeracinis poringumai bei cheminės savybės. Kaip vienas iš esminių supaprastinto žemės dirbimo pranašumų, nurodomas didesnis drėgmės kiekis dirvožemyje, ypač sausesniais metais (Lampurlanes, 2001). Didesnis drėgmės susikaupimas siejamas su geresne dirvožemio infiltracine galia (Shipitalo et. Al., 2000).

Dirvožemio drėgmės išsaugojimas kintant klimatui tampa vis aktualesnis ir mūsų šalyje. Sausringomis sąlygomis tiesioginės sėjos į nederbtą žemę technologija leidžia geriau išsaugoti drėgmę 0–10 cm dirvožemio sluoksnyje ir yra traktuojama kaip drėgmę tausojanti priemonė (Feiza ir kt. 2010). Tačiau, 2022–2024 m. meteorologinėmis sąlygomis, dirvožemio drėgmės kiekiui paviršiniame sluoksnyje neturėjo esminės įtakos nei tirtos žemės dirbimo sistemos, nei šiaudų panaudojimas (3. 1 pav.).



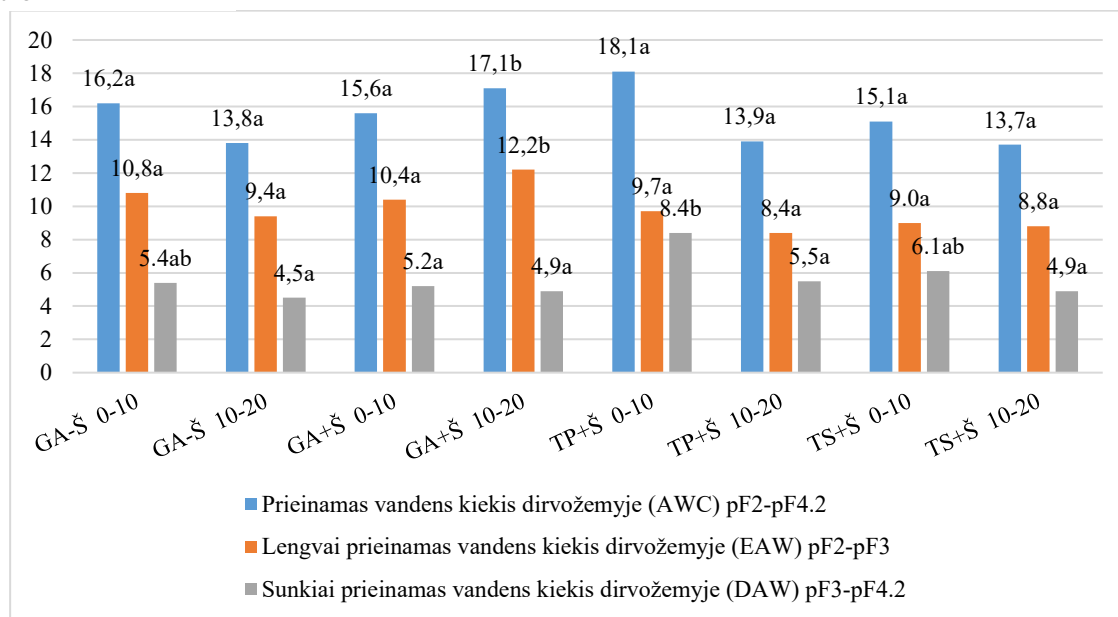
3. 1 pav. Dirvožemio drėgmės kiekis po žemės dirbimo, vegetacijos pradžioje, viduryje ir pabaigoje 2021–2024 m.

Pastaba: A veiksnys: -Š – be šiaudų (kontrolė), +Š – šiaudai susmulkinti ir paskleisti, B veiksnys GA – gilus arimas (kontrolė), TP – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais, TS – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių. Esminių skirtumų nėra: $P > 0,05$.

Mūsų gauti vandentalpos tyrimų duomenys (3. 2 pav.), kurie buvo atlikti Varšuvos gyvybės mokslų universitete, rodo, kad prieinamas vandens kiekis (AWC) apibrėžiamas pF2–pF4.2 intervale, kuriame gilus arimas su šiaudais (GA+Š) 10–20 cm gylyje pasiekia aukščiausią vertę – 17,1. Lengvai prieinamas vandens (EAW) (pF2–pF3) daugiausiai nustatyta giliai artoje dirvoje su šiaudais (GA+Š) 10–20 cm gylyje (12,2 %).

Palyginus su giliu arimu be šiaudų (GA-Š) 10-20 cm gylyje, šiaudus grąžinus į dirvą, prieinamo vandens kiekis (AWC) dirvoje buvo 3,3 % ir lengvai prieinamo vandens (EAW) 2,8 % didesnis, t. y. padidėjo atitinkamai 23,9 ir 29,8 procentiniais vienetais. Paviršiniame 0-10 cm sluoksnyje daugiausia prieinamo vandens rasta dirvoje be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais (TP+Š) - 18,1 %, t. y., palyginus su giliu arimu be šiaudų (GA-Š) tame pačiame sluoksnyje, padidėjo 11,7 procentiniais vienetais. Sunkiai prieinamo vandens (DAW) (pF3–pF4.2) daugiausia be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais ir su šiaudais sistemoje (TP+Š), 0–10 cm gylyje (8,4 %).

Vandens sulaikymo
pajėgumas %



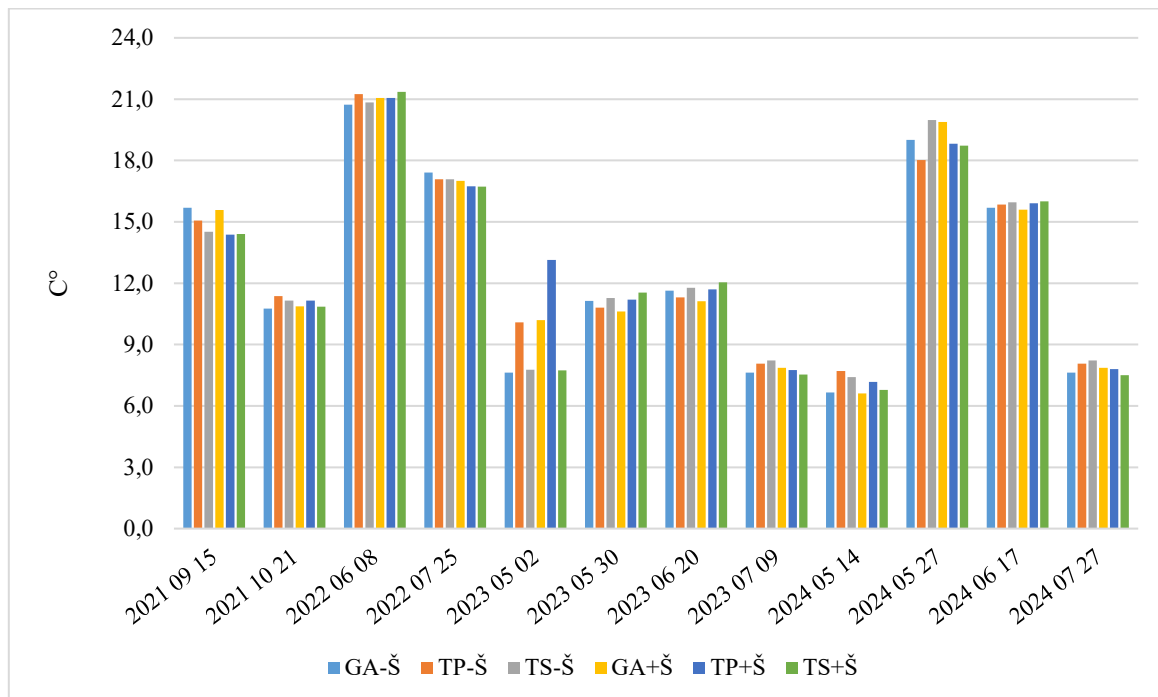
3. 2 pav. Dirvožemio vandentalpa, 2022 m.

Pastaba: A veiksnys: -Š – be šiaudų (kontrolė), +Š – šiaudai susmulkinti ir paskleisti, B veiksnys GA – gilus arimas (kontrolė), TP – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais, TS – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių.

Apibendrinant tenka konstatuoti, kad nedidelius vandens sulaikymo gebos pokyčius, gautus dėl tirtų žemės dirbimo sistemų, reikia išsamiau ištirti.

Šilumos apykaitos procesas dirvoje priklauso nuo meteorologinių sąlygų, dirvos šilumos laidumo, šiluminės talpos, vandens kiekio dirvoje ir kitų dirvos savybių. Vienas iš pagrindinių veiksnių, turinčių įtaką dirvos šiluminiam procesui yra žemės dirbimas ir dirvos paviršiaus padengimas įvairiais augalais arba jų liekanomis. Tačiau mūsų lauko eksperimente dirvožemio paviršinio sluoksnio temperatūrai esminės įtakos neturėjo nei tirtos žemės dirbimo sistemos, nei šiaudų panaudojimas (3.3 pav.).

Skirtingi žemės dirbimo metodai neturėjo reikšmingos įtakos dirvožemio temperatūrai vegetacijos metu. Meteorologinės sąlygos ir augalų danga turėjo didesnę įtaką dirvožemio šilumos apykaitai nei pats dirbimas. Dirvožemio drėgmė taip pat reikšmingai nesiskyrė tarp giluminio arimo ir neariminių sistemų. Tai rodo, kad ilgalaikėje perspektyvoje žemės dirbimo sistema mažai įtakoja dirvožemio temperatūros ir drėgmės dinamiką.



3. 3 pav. Dirvožemio temperatūra po žemės dirbimo, vegetacijos pradžioje, viduryje ir pabaigoje, 2021-2024 m.

Pastaba: A veiksnys: -Š – be šiaudų (kontrolė) , +Š – šiaudai susmulkinti ir paskleisti, B veiksnys GA – gilus arimas (kontrolė), TP – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais, TS – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių. Esminių skirtumų nėra: $P > 0,05$.

3.1.2. Dirvožemio agrocheminės savybės

Dirvožemio cheminės savybės yra pagrindiniai rodikliai, atspindintys ilgalaikį dirvožemio derlingumą, struktūros stabilumą ir maisto medžiagų prieinamumą augalams. Šiuos rodiklius lemia taikomos žemės dirbimo technologijos, organinės medžiagos įterpimas ir biologinių procesų intensyvumas. Gilus arimas dažnai skatina organinės medžiagos mineralizaciją ir maisto elementų išplovimą į gilesnius sluoksnius, o mažesnio intensyvumo technologijos, tokios kaip tarpinių pasėlių sėja į neįdirbtą dirvą ar tiesioginė sėja (nulinis žemės dirbimas), sudaro sąlygas didesnei organinės medžiagos akumuliacijai paviršiuje ir mikrobiologinės veiklos aktyvėjimui.

Katijonų mainų geba (CEC) yra vienas svarbiausių dirvožemio cheminės būklės ir derlingumo potencialo rodiklių, apibūdinantis jo gebėjimą absorbuoti ir išlaikyti teigiamai įkrautus jonus (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+} , H^{+}). Ši savybė glaudžiai susijusi su dirvožemio granulimetrine sudėtimi, organinės medžiagos kiekiu ir dirbimo intensyvumu. Gilus arimas paprastai mažina organinės medžiagos koncentraciją, todėl mažėja ir mainų kompleksas, o neariminės technologijos, priešingai, padeda išsaugoti humusą ir pagerina koloidinės frakcijos struktūrą, didindamos katijonų adsorbcijos pajėgumą.

Viršutiniame 0–10 cm sluoksnyje didžiausia CEC suma nustatyta taikant tarpinių pasėlių sėją į neįdirbtą dirvą (TP) – 29,6 cmol(+)/kg (3. 1 lentelė). Ši reikšmė buvo reikšmingai didesnė nei kontroliniame gilaus arimo be šiaudų (GA) variante (14,9 cmol(+)/kg). Tiesioginės sėjos (TS) variantas taip pat pasižymėjo didesne CEC verte (24,2 cmol(+)/kg), o gilus arimas su šiaudais (GA + š) sudarė tarpinę padėtį (19,5 cmol(+)/kg). Didžiausią įtaką CEC didėjimui turėjo Ca^{2+} kiekis, kuris TP variante buvo beveik du kartus didesnis nei kontrolėje (26,6 ir 12,5 cmol(+)/kg, atitinkamai). Tai rodo, kad mažesnio intensyvumo žemės dirbimas kartu su organinės medžiagos įterpimu padidina mainų kompleksą, skatindamas katijonų sorbciją ir stabilios agregatinės struktūros formavimąsi. Panaši tendencija pastebėta ir kitų pagrindinių katijonų (Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+}) atžvilgiu, nors jų skirtumai buvo mažesni.

3. 1 lentelė. Katijonų mainų geba (CEC) skirtinguose variantuose (0–10 ir 10–20 cm sluoksniuose), 2022 m.

Variantas 0-10 cm gylyje	Ca²⁺ (cmol(+)/kg)	Mg²⁺ (cmol(+)/kg)	K⁺ (cmol(+)/kg)	Na⁺ (cmol(+)/kg)	H⁺ (cmol(+)/kg)	CEC suma (cmol(+)/kg)
GA	12,50	2,04	0,24	0,08	0,05	14,90
GA+Š	17,08	2,04	0,33	0,04	0,04	19,53
TP +Š	26,56	2,40	0,54	0,08	0,06	29,64***
TS +Š	21,53	2,03	0,53	0,09	0,05	24,24***
Variantas 10-20 cm gylyje	Ca²⁺ (cmol(+)/kg)	Mg²⁺ (cmol(+)/kg)	K⁺ (cmol(+)/kg)	Na⁺ (cmol(+)/kg)	H⁺ (cmol(+)/kg)	CEC suma (cmol(+)/kg)
GA	29,93	1,89	0,39	0,16	0,06	32,43
GA+Š	28,44	1,85	0,38	0,16	0,06	30,88
TP +Š	29,72	1,81	0,38	0,13	0,05	32,08
TS +Š	30,13	1,82	0,39	0,14	0,06	32,54

Pastaba: GA– gilus arimas (kontrolė), GA+Š gulus arimas su šiaudais, TP+Š – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais su šiaudais, TS+Š – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių su šiaudais. Esminio skirtumo tikimybės lygis: ** - $P \leq 0,01$; *** - $P \leq 0.001$.

Gilesniame 10–20 cm sluoksnyje CEC reikšmės išliko aukštesnės neariminio dirbimo variantuose, tačiau skirtumai tarp sistemų buvo mažesni. Didžiausios vertės nustatytos tiesioginės sėjos (TS – 32,5 cmol(+)/kg) ir tarpinių pasėlių (TP – 32,1 cmol(+)/kg) variantuose, o kontrolinis GA be šiaudų siekė 32,4 cmol(+)/kg. Šie rezultatai rodo, kad ilgalaikėje perspektyvoje katijonų mainų geba giliau esančiuose sluoksniuose mažiau priklauso nuo dirbimo būdo, nes pagrindinį vaidmenį ten atlieka molio mineralai, o ne organinės medžiagos įtaka. Vis dėlto galima pastebėti, kad neariminio dirbimo sistemose Ca²⁺ kiekis išliko kiek mažesnis, tačiau vis dar pakankamai aukštas, rodantis stabilų mainų kompleksą ir tolygų jonų pasiskirstymą profilyje.

Apibendrinant galima teigti, kad tarpinių pasėlių sėja į neįdirbtą dirvą (TP) ir tiesioginė sėja (TS) turėjo teigiamą poveikį dirvožemio katijonų mainų gebai, ypač viršutiniame 0–10 cm sluoksnyje (3 lentelė), kur katijonų mainų geba buvo reikšmingai didesnė nei kontroliniame gilaus arimo (GA be šiaudų) variante. Šie rezultatai rodo, kad mažesnio intensyvumo dirbimo sistemos, derinamos su organinės medžiagos grąžinimu, gerina dirvožemio struktūrinį stabilumą, didina koloidinės frakcijos aktyvumą ir teigiamai veikia dirvožemio derlingumo palaikymą ilgalaikėje perspektyvoje.

Viršutiniame 0–10 cm sluoksnyje dirvožemio pH reikšmės svyravo nuo 6,7 iki 6,9 ir reikšmingų skirtumų tarp variantų nenustatyta (3.2 lentelė), todėl galima teigti, kad nei šiaudų įterpimas, nei dirbimo būdo intensyvumo mažinimas šiuo atveju nepakeitė dirvožemio reakcijos. Kalcio karbonatų (CaCO₃) kiekis šiame sluoksnyje buvo reikšmingai mažesnis gilaus arimo su šiaudais variante (GA) – 9,9 g/kg – lyginant su kontrole, t. y. giliu arimu be šiaudų (GA– 33,8 g/kg). Tuo tarpu taikant tarpinių pasėlių sėją į neįdirbtą dirvą (TP) nustatytas didžiausias CaCO₃ kiekis – 40,2 g/kg– kas rodo, kad ši sistema skatina karbonatų kaupimąsi viršutiniuose dirvožemio sluoksniuose.

Fosforo (P) kiekis 0–10 cm sluoksnyje reikšmingai didėjo taikant neariminio dirbimo technologijas. Didžiausi kiekiai nustatyti taikant tarpinių pasėlių sėją į neįdirbtą dirvą (TP – 110,8 mg/kg) ir tiesioginę sėją (TS – 116,1 mg/kg), lyginant su kontrole (GA– 79,0 mg/kg). Tokie rezultatai rodo, kad ilgalaikis šiaudų įterpimas ir sumažintas dirvožemio judinimas pagerina

fosforo prieinamumą augalams. Panaši tendencija stebėta ir kalio (K) bei magnio (Mg) pasiskirstyme – jų kiekiai buvo reikšmingai didesni visose neariminio dirbimo sistemose. Didžiausios esminės koncentracijos nustatytos TP ir TS variantuose (K – 231–236 mg/kg; Mg – 275–285 mg/kg). Šie rezultatai rodo, kad neariminio dirbimo sistemos su šiaudų įterpimu sudaro palankesnes sąlygas maisto elementų išsaugojimui viršutiniuose sluoksniuose, tikėtina, dėl intensyvesnės mikrobiologinės veiklos ir didesnės organinės medžiagos akumuliacijos.

3. 2 lentelė. Skirtingų žemės dirbimo sistemų įtaka dirvožemio fiziniams ir cheminiams savybėms 0–10 ir 10–20 cm sluoksniuose, 2022 m.

Variantas 0-10 cm gylyje	Smėlis (%)	Dulkės (%)	Molis (%)	pH (KCl)	CaCO ₃ (g/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Mg (mg/kg)
GA	45	42	13	6,9	33,8	79,0	127,6	227,5
GA+Š	40	46	15	6,8	9,9***	78,2	164,3	258,7
TP+Š	44	49	7	6,7	40,2	110,8*	236,4**	275,1**
TS+Š	44	49	7	6,8	33,8	116,1**	231,0**	285,1**
Variantas 10-20 cm gylyje	Smėlis (%)	Dulkės (%)	Molis (%)	pH (KCl)	CaCO ₃ (g/kg)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Mg (mg/kg)
GA	43	51	6	7,1	22,5	51,0	147,7	208,5
GA+Š	44	50	6	7,1	21,1	50,3	143,4	207,8
TP+Š	43	50	7	7,1	32,4**	49,1	146,4	204,4
TS+Š	43	51	7	7,1	26,3	48,3	149,8	202,7

Pastaba: GA– gilus arimas (kontrolė), GA+Š gulus arimas su šiaudais, TP+Š – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais su šiaudais, TS+Š – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių su šiaudais. Esminio skirtumo tikimybės lygis: ** - $P \leq 0,01$; *** - $P \leq 0,001$.

Gilesniame 10–20 cm sluoksnyje bendros tendencijos išliko panašios (3. 2 lentelė), tačiau skirtumai tarp variantų buvo mažesni. Dirvožemio pH šiame sluoksnyje buvo vienodas visuose variantuose (apie 7,1), kas rodo, kad dirbimo sistema neturėjo reikšmingos įtakos dirvožemio reakcijai giliau. Reikšmingai didesnis CaCO₃ kiekis nustatytas taikant tarpinių pasėlių sėją į neįdirbtą dirvą (TP – 32,4 g/kg), kas rodo karbonatų kaupimąsi neariminio dirbimo sistemose. Kitų elementų (P, K, Mg) pasiskirstymas 10–20 cm sluoksnyje buvo artimas kontrolės reikšmėms, tačiau šiek tiek didesnės vertės stebėtos TP ir TS variantuose, kas rodo, kad neariminio dirbimo sistemos palaipsniui gerina maistinių medžiagų pasiskirstymą ir giliau esančiuose sluoksniuose.

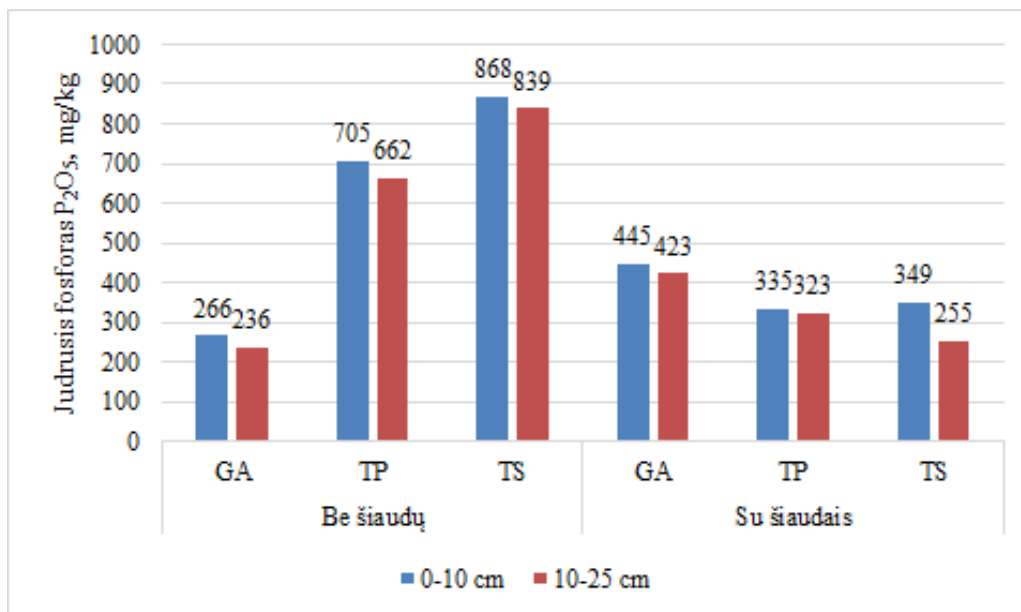
Gauti rezultatai patvirtina, kad tarpinių pasėlių sėją į neįdirbtą dirvą ir tiesioginę sėją (nulinis žemės dirbimas), ypač taikant šiaudų įterpimą, pagerina viršutinio dirvožemio sluoksnio maistinių medžiagų balansą ir chemines savybes, lyginant su kontroliniu gilaus arimo be šiaudų variantu. Tuo tarpu gilus arimas, nors ir užtikrina tolygesnę dirvožemio struktūrą, ilgainiui lemia mažesnę maistinių medžiagų kaupimąsi paviršiuje dėl intensyvesnės organinės medžiagos mineralizacijos.

Dirvožemyje fosforo yra daugiau nei dirvodarinėse uolienose. Gilesniuose dirvožemio sluoksniuose fosforo kiekis mažėja. Didesnis fosforo kiekis viršutiniuose dirvožemio sluoksniuose aiškintinas tuo, kad augalų šaknys jį iškelia iš apatinių sluoksnių. Fosforas yra vienas iš pagrindinių elementų, būtinų visiems gyviems organizmams. Lietuvos dirvožemiuose yra labai nedaug judriojo fosforo. Papildomai netręšiant, fosforo atsargų dirvožemyje pakaktų tik 2,0 t ha⁻¹ javų derliui. O mažiausias dirvožemio fosforo lygis, kompensuojamas dūlėjimo proceso, yra 20–50 mg kg⁻¹ P₂O₅ (Gužys 2013).

Mūsų tyrimų rezultatai rodo (3.4 pav.), kas šiaudų įterpimas (+Š) didino judriojo fosforo kiekį tirtuose dirvožemio sluoksniuose, lyginant su dirva be šiaudų (-Š). Laukeliuose, kuriuose

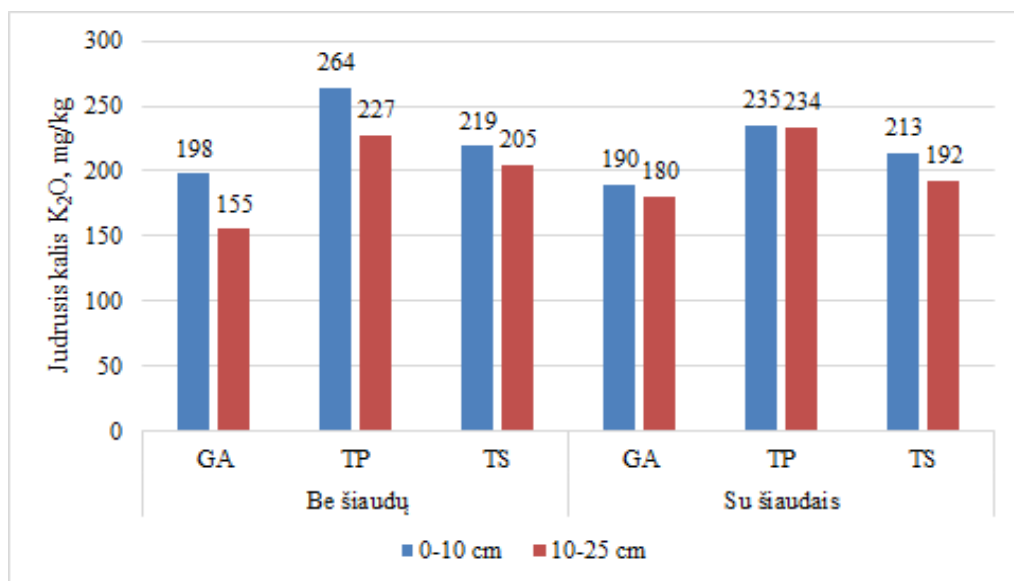
taikyta tarpinių pasėlių sėja į neįdirbtą dirvą (TP) ir tiesioginė sėja (nulinis žemės dirbimas, TS) viršutiniame ir apatiniame dirvožemio sluoksniuose nustatytas esmingai didesnis nuo 2,8 iki 3,3 karto judriojo fosforo (P_2O_5) kiekis, lyginat su giliu arimu (GA) dirvoje be šiaudų.

Svarbiausias augalų mityboje – kalis, kurio pasisavinimas priklauso nuo daugelio geocheminių bei agroklmatinių sąlygų (Gužys 2013). Judriojo kalio kiekio tyrimų rezultatai pateikti 3.5 paveiksle. Viršutiniame tirtu dirvožemio sluoksnyje judriojo kalio (K_2O) kiekis nustatytas didesnis nuo 1,1 iki 1,3 karto laukeliuose, kuriuose buvo taikyta tarpinių pasėlių sėja į neįdirbtą dirvą (TP) ir tiesioginė sėja (nulinis žemės dirbimas, TS), lyginat su giliu arimu (GA), tiek laukeliuose su šiaudais, tiek kur šiaudai buvo paskleisti. Gilesniame (10–25 cm) dirvožemio sluoksnyje nustatytos panašios tendencijos. Visuose laukeliuose kuriuose buvo taikyti mažiausio intensyvumo žemės dirbimai, nustatytas didesnis nuo 1,1 iki 1,5 karto judriojo kalio (K_2O) kiekis, nei giliai artuose laukeliuose (GA).



3.4 pav. Judriojo fosforo (P_2O_5) kiekis skirtinguose dirvožemio sluoksniuose 2023 m.

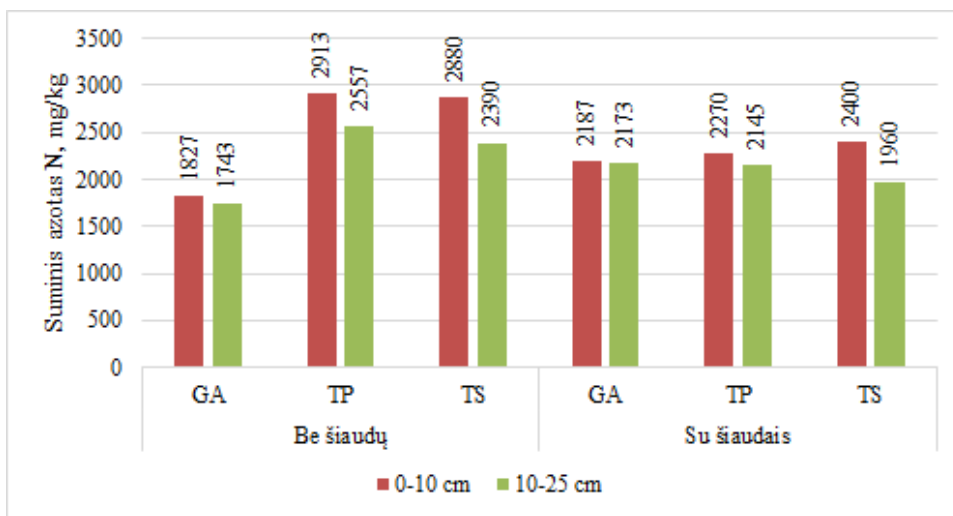
Pastaba: A veiksnys: -Š – be šiaudų (kontrolė), +Š – šiaudai susmulkinti ir paskleisti, B veiksnys GA – gilus arimas (kontrolė), TP – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais, TS – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių.



3.5 pav. Judriojo kalio (K_2O) kiekis skirtinguose dirvožemio sluoksniuose 2023 m.

Pastaba: A veiksnys: -Š – be šiaudų (kontrolė), +Š – šiaudai susmulkinti ir paskleisti, B veiksnys GA – gilus arimas (kontrolė), TP – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais, TS – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių.

ŽŪA Bandymų stotyje 2023 metais atliktų tyrimų duomenys rodo (3.6 pav.), kad nuo 1,4 iki 1,7 karto didesnis suminis azoto kiekis yra laukeliuose, kuriuose taikyta tarpinių pasėlių sėja į neįdirbtą dirvą (TP) ir tiesioginė sėja (nulinis žemės dirbimas, TS), lyginat su giliu arimu (GA) kur šiaudai buvo pašalinti. tiek laukeliuose su šiaudais, tiek kur šiaudai buvo paskleisti.



3.6 pav. Suminis azoto kiekis skirtinguose dirvožemio sluoksniuose 2023 m.

Pastaba: A veiksnys: -Š – be šiaudų (kontrolė), +Š – šiaudai susmulkinti ir paskleisti, B veiksnys GA – gilus arimas (kontrolė), TP – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais, TS – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių.

3.1.3. Dirvožemio organinės medžiagos sankaupos ir stabilumas

Nustatyta, kad bendrosios organinės anglies kiekis ir dirvožemio organinės medžiagos Dirvožemio organinės medžiagos (DOM) frakcinės sudėties analizė leidžia įvertinti ne tik bendrą anglies kiekį, bet ir jos pasiskirstymą tarp skirtingo stabilumo junginių, lemiančių humuso kokybę ir dirvožemio ilgaamžį tvarumą. Tyrimo metu nustatyta, kad organinės medžiagos frakcijų pasiskirstymas labai priklausė nuo taikytos žemės dirbimo sistemos ir šiaudų įterpimo. Didžiausi pokyčiai fiksuoti tarpinių pasėlių sėjos į neįdirbtą dirvą (TP+Š) ir tiesioginės sėjos (TS+Š) variantuose, lyginant su kontrole giliu arimu be šiaudų (GA–Š) variantu

3. 3 lentelė. Dirvožemio organinės anglies kiekio ir dirvožemio organinės medžiagos (DOM) frakcijų pokyčiai, 2022 m.

	Bendra organinė anglis	Laisvoji organinės medžiagos frakcija	Huminės rūgštys	Fulvinės rūgštys	Huminas	Laisvoji organinės medžiagos frakcija	Huminės rūgštys	Fulvinės rūgštys	Huminas	Huminės rūgštys/ Fulvinės rūgštys
	g kg ⁻¹					C% in TOC				
GA (kontrolė)	18,1	0,74	9,53	2,87	4,92	4,10	52,80	15,88	27,22	3,34
GA+Š	20,9	0,77	8,89	7,21***	4,04	3,69	42,78*	34,28***	19,25*	1,42*
TP+Š	34,1**	1,10*	16,09***	7,80***	9,09**	3,24	47,29	22,83**	26,64	2,38*
TS+Š	30,3**	0,99	17,94***	5,32**	6,02*	3,28	60,10*	16,78	19,84*	4,43*

Pastaba: GA– gilus arimas (kontrolė), GA+Š gulus arimas su šiaudais, TP+Š – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais su šiaudais, TS+Š – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių su šiaudais. Esminio skirtumo tikimybės lygis: ** - $P \leq 0,01$; *** - $P \leq 0,001$.

Dirvožemio organinės medžiagos frakcinės sudėties tyrimas atskleidė reikšmingą taikomų žemės dirbimo būdų ir šiaudų įterpimo įtaką organinės anglies pasiskirstymui skirtingose jos frakcijose. Bendrosios organinės anglies kiekis viršutiniame 0–10 cm sluoksnyje didėjo mažėjant dirbimo intensyvumui (3.3 lentelė). Didžiausi kiekiai nustatyti tarpinių pasėlių sėjos į neįdirbtą dirvą (TP+Š) ir tiesioginės sėjos (TS+Š) variantuose, atitinkamai 34,1 ir 30,3 g/kg, o mažiausias – kontroliniame gilaus arimo be šiaudų (GA–Š) variante, kurio reikšmė siekė 18,1 g/kg. Tai rodo, kad tarpinių pasėlių auginimas ir šiaudų įterpimas sudarė sąlygas organinės medžiagos kaupimuisi dirvos paviršiuje ir jos stabilizacijai. GA+Š variante organinės anglies kiekis buvo didesnis nei kontrolėje, tačiau pokytis buvo mažesnis nei sistemose, kuriose taikyti tarpiniai pasėliai.

Analizuojant laisvosios organinės medžiagos frakciją (FF), didžiausias jos kiekis nustatytas TP+Š variante (1,10 g/kg), o mažiausias kontrolėje (0,74 g/kg). Ši frakcija yra biologiškai aktyviausia organinės medžiagos dalis, todėl didesnis jos kiekis rodo aktyvesnius mikrobiologinius procesus ir didesnę šviežios biomasės indėlį. Tai patvirtina, kad tarpinių pasėlių šaknų ir liekanų įterpimas skatina aktyviosios organinės medžiagos kaupimąsi viršutiniame dirvos sluoksnyje.

Huminės (HA) ir fulvinės (FA) rūgštys – pagrindinės humuso sudedamosios dalys – taip pat kito priklausomai nuo dirbimo būdo. Didžiausias huminių rūgščių kiekis nustatytas TS+Š (17,94 g/kg) ir TP+Š (16,09 g/kg) variantuose, o mažiausias – GA–Š (9,53 g/kg). Fulvinės rūgštys didžiausią koncentraciją pasiekė GA+Š (7,21 g/kg) ir TP+Š (7,80 g/kg) variantuose, o šie duomenys rodo, kad organinių liekanų ir tarpinių pasėlių taikymas aktyvino humifikacijos procesus. Tokie pokyčiai rodo, kad sumažintas dirvos judinimas, kartu su nuolatinio organinių medžiagų papildymu, didina tiek lengviau, tiek sunkiau skaidomų junginių kieki, kurie yra svarbūs humuso susidarymui.

Humino kiekis, kuris laikomas labiausiai stabilizuota ir ilgalaikę organinės medžiagos formą apibūdinančia frakcija, buvo didžiausias TP+Š variante (9,09 g/kg), o mažiausias – GA–Š (4,92 g/kg). Šis skirtumas rodo, kad ilgalaikis tarpinių pasėlių auginimas kartu su šiaudų įterpimu sudaro palankias sąlygas humino formavimuisi ir jo stabilizacijai dirvožemyje. Tokiu būdu šiose sistemose formuojasi patvaresnė organinė frakcija, prisidedanti prie dirvožemio struktūros gerėjimo ir ilgalaikio anglies kaupimo.

Huminės ir fulvinės rūgščių santykis (HA/FA) yra svarbus organinės medžiagos brandos rodiklis, rodantis humifikacijos proceso intensyvumą. Didžiausios santykio reikšmės nustatytos TS+Š (4,43) ir TP+Š (2,38) variantuose, rodančiuose vyraujančius huminius junginius ir labiau humifikuotą organinę medžiagą. Mažiausias HA/FA santykis (1,42) fiksuotas GA+Š variante, kur vyrauja fulvinio tipo junginiai, būdingi mažiau brandžiai organinei medžiagai. Šie duomenys rodo, kad tarpiniai pasėliai ir sumažintas dirvos dirbimas ne tik skatina organinės medžiagos kaupimąsi, bet ir spartina jos kokybinę transformaciją į stabilesnes humines formas.

Apibendrinant galima teigti, kad tarpinių pasėlių sėja į neįdirbtą dirvą (TP+Š) ir tiesioginė sėja (TS+Š) buvo efektyviausios sistemos, didinančios bendrą organinės medžiagos kiekį ir humifikacijos lygį viršutiniame dirvos sluoksnyje. Šiose sistemose vyko intensyvesnė organinių junginių polimerizacija ir huminių rūgščių kaupimasis, o tai sudaro palankesnes sąlygas ilgalaikiam anglies stabilizavimui. Tuo tarpu gilus arimas, ypač be šiaudų, skatino organinės medžiagos mineralizaciją, mažino huminių junginių kiekį ir silpnino dirvožemio gebėjimą kaupti anglį. Tokie rezultatai rodo, kad tarpinių pasėlių ir šiaudų taikymas yra svarbus veiksnys, didinantis ne tik organinės medžiagos kiekį, bet ir jos kokybinį stabilumą, o tai lemia tvaresnę dirvožemio ekosistemos funkcionavimą. Šios analizės atliktos (ėminiai išanalizuoti) Vakarų Pomeranijos universitete, Lenkijoje.

Dirvožemio anglies ir azoto santykis yra vienas iš svarbiausių rodiklių, atspindinčių organinės medžiagos būklę, jos kaupimosi ir skaidymosi procesus, bei dirvožemio derlingumo potencialą. Šių elementų kiekiai ir jų santykis glaudžiai susiję su taikoma žemės dirbimo sistema, augalinių liekanų įterpimu ir dirvožemio biologiniu aktyvumu. Vertinant bendrosios, organinės anglies bei suminio azoto kiekius, siekta nustatyti, kaip skirtingos dirbimo technologijos – gilus arimas (GA), gilus arimas su šiaudais (GA+Š), bežemės dirbimo sistema su tarpinių pasėlių

įterpimu (TP+Š) ir tiesioginė sėja be žemės dirbimo (TS+Š) – paveikė anglies ir azoto pasiskirstymą skirtinguose dirvožemio sluoksniuose iki 100 cm gylio (3.6 lentelė).

Viršutiniame 0–10 cm sluoksnyje nustatyti ryškūs skirtumai tarp variantų. Daugiausia tiek bendrosios, tiek organinės anglies aptikta TP+Š ir TS+Š variantuose, kur anglies kiekiai daugiau nei dvigubai viršijo kontrolinį (GA) variantą. Šie skirtumai rodo, kad šiaudų įterpimas kartu su tarpinių pasėlių auginimu ir nejudintu dirvos paviršiumi sudaro palankesnes sąlygas organinės medžiagos kaupimuisi viršutiniame sluoksnyje. Tuo tarpu gilus arimas, ypač be šiaudų, lemia spartesnę organinės medžiagos mineralizaciją ir mažesnę anglies kiekį dirvos paviršiuje. TN pasiskirstymas 0–10 cm sluoksnyje atitiko TOC tendencijas – didžiausios azoto koncentracijos nustatytos TP+Š ir TS+Š variantuose, o C/N santykis išliko artimas 12, rodantis stabilūs mikrobiologinės veiklos procesus.

3. 4 lentelė. Bendrosios ir organinės anglies, suminio azoto bei C/N santykio pasiskirstymas 0–100 cm dirvožemio sluoksnyje, 2022 m.

Gylis (cm)	Variantai	Bendroji anglis (g/kg)	Bendroji organinė anglis (g/kg)	Suminis azotas (g/kg)	C/N dirvožemio santykis
0–10	GA	18.79	18.07	1.47	12.37
	GA+Š	21.90	20.90	1.62	12.94
	TP +Š	37.34	30.52	2.46	12.33
	TS +Š	36.77	30.26	2.41	12.57
10–20	GA	30.27	23.97	2.09	11.89
	GA+Š	29.12	22.82	1.79	12.72
	TP +Š	31.29	25.55	2.54	10.32
	TS +Š	30.68	24.69	2.15	11.87
20–40	GA	13.82	12.29	0.98	12.39
	GA+Š	16.99	15.73	1.31	12.44
	TP +Š	30.79	20.71	2.11	9.85
	TS +Š	22.72	17.06	1.19	14.40
40–60	GA	10.00	4.42	0.33	13.06
	GA+Š	10.45	4.84	0.25	19.25
	TP +Š	11.73	4.16	0.42	10.20
	TS +Š	12.27	3.89	0.34	11.80
60–80	GA	9.86	4.83	0.27	19.14
	GA+Š	9.64	2.87	0.10	29.67
	TP +Š	13.50	2.75	0.34	7.71
	TS +Š	14.24	2.84	0.27	10.60
80–100	GA	14.69	5.04	0.28	19.19
	GA+Š	13.69	2.63	0.17	17.02
	TP +Š	15.43	3.15	0.38	8.32
	TS +Š	19.21	3.36	0.30	11.08

Pastaba: GA– gilus arimas (kontrolė), GA+Š gulus arimas su šiaudais, TP+Š – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais su šiaudais, TS+Š – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių su šiaudais.

Gilesniame 10–20 cm sluoksnyje bendrosios ir organinės anglies kiekiai buvo šiek tiek mažesni nei paviršiuje (3. 4 lentelė), tačiau tendencijos išliko panašios. Bežemės dirbimo variantai (TP+Š ir TS+Š) išsiskyrė didesniu anglies ir azoto kiekiu, o GA ir GA+Š variantuose nustatyti mažesni kiekiai. Tai rodo, kad konservatyvios dirbimo sistemos ne tik išsaugo organinę medžiagą viršuje, bet ir palaipsniui prisideda prie jos kaupimosi gilesniuose sluoksniuose. C/N santykis šiame gylyje šiek tiek mažėjo TP+Š variante, o tai gali rodyti spartesnę organinės medžiagos

mineralizavimą aktyvesnių biologinių procesų sąlygomis. 20–40 cm sluoksnyje anglies ir azoto koncentracijos toliau mažėjo visose dirbimo sistemose, tačiau TP+Š variantas vis dar išliko išsiskiriantis, turėdamas didesnį anglies kiekį, palyginti su kontrole. Šis efektas rodo, kad bežemės dirbimo technologijos skatina anglies pernešimą į gilesnius sluoksnius per šaknų sistemą ir bioporų formavimąsi. GA ir GA+Š variantuose anglies kiekiai buvo ženkliai mažesni, o C/N santykis išliko artimas 12, būdingas stabilizuotai organinei medžiagai.

Nuo 40 iki 80 cm gylio sluoksniuose anglies ir azoto koncentracijos ženkliai sumažėjo visose sistemose. Šiuose gyliuose dominavo GA ir GA+Š variantai, kuriuose fiksuotas didesnis C/N santykis (iki 19–29), rodantis lėtesnį organinės medžiagos skaidymąsi ir didesnį stabilizuotos organinės anglies kiekį. Tuo tarpu TP+Š ir TS+Š variantuose mažesnis C/N santykis (apie 8–12) gali rodyti aktyvesnį mikroorganizmų poveikį ir didesnį organinės medžiagos biologiškai prieinamą kiekį.

Giliausiam 80–100 cm sluoksnyje anglies ir azoto koncentracijos buvo mažiausios, tačiau TP+Š variantas išliko tendencingai didesnis nei kontrolinis. Tai gali būti susiję su tarpinių pasėlių šaknų sistema, kuri efektyviau perneša organinę medžiagą į gilesnius dirvos horizontus. Tuo tarpu GA ir GA+Š variantuose šie parametrai buvo žemiausi, o didesnis C/N santykis (17–19) rodo, kad gilus arimas mažina organinės anglies pernešimą į apatinius sluoksnius.

Apibendrinant galima teigti, kad tarpinių pasėlių sėja į neįdirbtą dirvą (TP+Š) ir tiesioginė sėja (TS+Š) buvo efektyviausios, didinančios organinės medžiagos kiekį ir skatinančios patvariausios dirvožemio organinės medžiagos kaupimąsi dirvožemyje. Šios sistemos, derinant tiesioginę sėją ir organinių liekanų įterpimą, sudarė sąlygas didesniai humifikuotų junginių susidarymui ir ilgalaikiam anglies stabilizavimui. Tuo tarpu gilus arimas, ypač be šiaudų, skatino organinės medžiagos mineralizaciją ir mažino DOM kiekį, todėl laikytinas mažiau tvariu dirvožemio tvarkymo būdu.

Huminas yra viena iš patvariausių dirvožemio organinės medžiagos (DOM) frakcijų, kuri pasižymi itin dideliu atsparumu mikrobinei skaidai ir lemia ilgalaikį anglies bei azoto išsilaikymą dirvožemyje. Šios frakcijos cheminė sudėtis ir struktūrinės savybės glaudžiai susijusios su dirvožemio derlingumo palaikymu, koloidinių savybių formavimu bei maisto medžiagų buferinėmis funkcijomis. Humino elementinė sudėtis, ypač C, H, O, N ir S santykiai, leidžia įvertinti organinės medžiagos oksidacijos laipsnį, aromatinį pobūdį ir biologinės kilmės pokyčius, susijusius su skirtingais žemės dirbimo būdais bei šiaudų įterpimu.

Pelenų kiekis humine atspindi neorganinių junginių, susijusių su molio mineralais ir metalų oksidais, kiekį, kuris turi įtakos humino struktūros stabilumui. Aukštesnis pelenų kiekis paprastai siejamas su didesne mineralinių komponentų įtaka organinės medžiagos formavimuisi, o mažesnis – su organinės anglies dominavimu.

Analizuojant elementinę sudėtį, H/C ir O/C santykiai naudojami kaip huminių medžiagų brandos rodikliai: mažesnės reikšmės rodo didesnį aromatinių junginių kiekį ir aukštesnį humifikacijos lygį, o didesnės – labiau oksiduotas, mažiau stabilias struktūras. Šių tyrimų tikslas buvo nustatyti, kaip skirtingos žemės dirbimo sistemos ir šiaudų įterpimas keičia humino pelenų kiekį bei jo elementinę sudėtį, siekiant įvertinti, kuri iš sistemų sudaro palankesnes sąlygas organinės anglies stabilizacijai ir huminių medžiagų kokybiniais pokyčiams 0–10 cm dirvožemio sluoksnyje (3.5 lentelė).

3. 5 lentelė. Humino pelenų kiekis ir elementinė sudėtis 0–10 cm dirvožemio sluoksnyje, 2022

Variantai	Pelenai (%)	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	H/C	O/C	N/C
GA	29.31	47.82	5.57	42.85	2.39	1.38	1.40	0.67	0.04
GA+Š	34.78	26.54	3.61	68.22	1.38	0.26	1.63	1.93	0.04
TP+Š	18.57	42.30	5.06	47.85	2.06	2.72	1.44	0.84	0.05
NT+Š	29.49	42.91	4.47	50.32	1.95	0.34	1.25	0.88	0.04

m.

Pastaba: GA– gilus arimas (kontrolė), GA+Š gulus arimas su šiaudais, TP+Š – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais su šiaudais, TS+Š – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių su šiaudais.

Analizuojant humino pelenų kiekį nustatyta, kad reikšmės svyravo nuo 18,57 iki 34,78 %, priklausomai nuo taikytos žemės dirbimo sistemos ir šiaudų įterpimo. Mažiausias pelenų kiekis nustatytas TP+Š variante (18,57 %), o didžiausias – GA+Š (34,78 %). Šie rezultatai rodo, kad mažiau intensyvus dirbimas kartu su šiaudų įterpimu sumažina neorganinės frakcijos kaupimąsi humine, kas gali būti siejama su didesniu organinių junginių įsiterpimu ir mažesne mineralinių komponentų įtaka. Priešingai, giliame arime su šiaudais didesnis pelenų kiekis gali atspindėti didesnę humino susirišimą su molio mineralais ir metalų oksidais, lemiančiais didesnę mineralinių stabilumą, bet mažesnę organinės kilmės dominavimą.

Anglies kiekis (C%) humine kito nuo 26,54 iki 47,82 %, o didžiausios reikšmės nustatytos GA (47,82 %) ir TP+Š (42,30 %) variantuose. Tai rodo, kad šiose sistemose humino frakcijoje vyrauja didesnis organinės kilmės junginių kiekis, atspindintis geresnę anglies išsilaikymą. Sumažėjęs C kiekis GA+Š variante (26,54 %) leidžia manyti, kad intensyvesnis dirbimas kartu su šiaudų įterpimu paspartina huminių medžiagų oksidaciją ir skatina labiau oksiduotų junginių formavimąsi.

Vandenilio (H%) kiekis svyravo nuo 3,61 iki 5,57 %, o GA ir TP+Š variantai išsiskyrė aukštesnėmis reikšmėmis (atitinkamai 5,57 ir 5,06 %). Tai rodo, kad šiuose variantuose humino struktūroje vyrauja didesnė alifatinių junginių dalis, susijusi su mažesniu aromatinio pobūdžiu. Tuo tarpu GA+Š (3,61 %) huminas pasižymi mažesniu H kiekiu, o tai gali rodyti didesnę struktūrinę aromatiškumą. Deguonies kiekis (O%) buvo reikšmingai didesnis GA+Š variante (68,22 %), palyginti su kitais variantais (42,85–50,32 %). Tokia reikšminga O padidėjimo tendencija rodo aukštesnę humino oksidacijos laipsnį, kuris gali būti susijęs su aktyvesniais mikrobiologiniais procesais ir didesniu deguonį turinčių funkcinių grupių (karboksilinių, hidroksilinių) kiekiu. Azoto (N%) kiekis kito nuo 1,38 iki 2,39 %, didžiausias buvo GA variante, o mažiausias GA+Š. Tai rodo, kad šiaudų įterpimas giliame arime galėjo paskatinti N išplovimą ar jo imobilizaciją mikrobiniame biomasėje. Sieros (S%) kiekis buvo didžiausias TP+Š variante (2,72 %), o mažiausias – GA+Š (0,26 %), kas gali būti susiję su didesne organinės sieros junginių kaupimosi tendencija mažiau intensyvaus dirbimo sąlygomis. Analizuojant elementinius santykius, nustatyta, kad H/C santykis kito nuo 1,25 iki 1,63, o O/C santykis – nuo 0,67 iki 1,93. Mažesnis H/C ir O/C santykis (GA ir TP+Š variantuose) rodo didesnę humino aromatinį junginių kiekį ir aukštesnę humifikacijos lygį. Tuo tarpu GA+Š variantas pasižymėjo itin aukštu O/C santykiu (1,93), kas liudija labiau oksiduotas, mažiau stabilias humino struktūras. N/C santykis išliko pastovus (0,04–0,05) visose sistemose, kas rodo, kad azoto junginių įtraukimas į humino struktūrą nėra labai priklausomas nuo žemės dirbimo intensyvumo, bet labiau susijęs su organinės medžiagos kilme ir mikrobinės veiklos intensyvumu.

Apibendrinant galima teigti, kad žemės dirbimo būdas ir šiaudų įterpimas reikšmingai veikė humino cheminę sudėtį ir oksidacijos laipsnį. Mažiau intensyvūs dirbimo variantai (TP+Š ir NT+Š) pasižymėjo didesniu organinės anglies ir sieros kiekiu bei mažesnėmis O/C reikšmėmis (3.4 lentelė), kas rodo labiau redukuotą ir stabilesnę humino struktūrą (3 lentelė). Tuo tarpu gilus arimas su šiaudais (GA+Š) sąlygojo humino oksidacijos didėjimą, kas atsispindi itin aukštu deguonies kiekiu ir O/C santykiu, rodant didesnę huminių medžiagų dekarbonizacijos ir struktūrinio deguonies kaupimosi laipsnį. Šie rezultatai leidžia teigti, kad mažesnio intensyvumo dirbimo sistemos su organinių liekanų įterpimu skatina stabilesnių huminių junginių formavimąsi, o tai turi tiesioginę reikšmę ilgalaikiam dirvožemio anglies išsilaikymui ir tvariam dirvožemio produktyvumo palaikymui.

Dirvožemio organinės medžiagos (DOM) kokybinė ir kiekybinė sudėtis yra vienas esminių rodiklių, apibrėžiančių dirvožemio derlingumą, struktūrinį stabilumą ir gebėjimą kaupti anglį. Šių savybių išlaikymui ypatingą reikšmę turi organinės medžiagos frakcionavimas, leidžiantis atskirti skirtingo stabilumo anglies rezervuarus. Pagrindinės DOM frakcijos – dalelių pavidalo organinė medžiaga (POM) ir mineralais susijusi organinė medžiaga (MAOM) – atspindi du fundamentaliai skirtingus anglies kaupimo mechanizmus dirvožemyje. POM frakcija susideda iš nesuirusių ar dalinai suirtų augalinių liekanų, mikrobiologinės kilmės komponentų bei kitų lengvai mineralizuojamų organinių junginių. Ji laikoma „aktyviaja“ DOM dalimi, jautriausiai

reaguojančia į aplinkos ir dirbimo sistemų pokyčius, todėl jos kiekio pokyčiai gali būti laikomi ankstyvais dirvožemio būklės indikatoriais.

MAOM frakcija, priešingai, siejama su patvaresnėmis organinės medžiagos formomis, kurios stabilizuojasi dėl stiprių jungčių su mineralinėmis dalelėmis, molio ir oksidų paviršiais. Šios sąveikos lemia lėtesnę organinės medžiagos skaidą ir ilgesnį anglies išsilaikymo laiką dirvožemyje, todėl MAOM laikoma pagrindiniu ilgalaikio anglies sekvestravimo rezervuaru.

Nagrinėjant POM ir MAOM santykį bei šių frakcijų anglies (C) ir azoto (N) kiekį, galima įvertinti organinės medžiagos stabilumo, humifikacijos ir biocheminių transformacijų intensyvumą. Skirtingos žemės dirbimo praktikos – nuo gilaus arimo iki tiesioginės sėjos – lemia organinės medžiagos akumuliacijos bei mineralizacijos pusiausvyrą. Be to, šiaudų įterpimas ir tarpinių pasėlių naudojimas keičia DOM sudėtį, skatindamas biogeninių elementų kaupimąsi viršutiniuose dirvožemio sluoksniuose bei didindamas huminių medžiagų dalį.

Todėl šio tyrimo tikslas buvo įvertinti įvairių žemės dirbimo sistemų poveikį POM ir MAOM frakcijų pasiskirstymui bei jų anglies ir azoto kiekiui 0–10 cm dirvožemio sluoksnyje (3.4 lentelė), siekiant nustatyti, kurios sistemos sudaro palankiausias sąlygas organinės medžiagos kaupimuisi ir jos stabilizacijai dirvožemyje.

3. 6 lentelė. POM ir MAOM frakcijų pasiskirstymas bei jų C ir N kiekis 0–10 cm dirvožemio sluoksnyje

Variantai	POM (%)	MAOM (%)	POM-C (%)	MAOM-C (%)	POM-N (%)	MAOM-N (%)
GA (kontrolė)	47.3	52.7	0.63	2.65	0.05	0.29
GA+Š	41.4	58.6	0.62	2.96	0.04	0.29
TP+Š	45.7	54.3	1.77	4.77	0.14	0.41
NT+Š	48.0	52.0	2.26	4.45	0.17	0.38

Pastaba: GA – gilus arimas (kontrolė), GA+Š – gilus arimas su šiaudais, TP+Š – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais su šiaudais, TS+Š – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių su šiaudais.

Analizuojant 0–10 cm dirvožemio sluoksnį nustatyta, kad organinės medžiagos frakcijų pasiskirstymas ir jų cheminė sudėtis priklausė nuo taikytos žemės dirbimo sistemos bei šiaudų įterpimo. Dalelių pavidalo organinės medžiagos (POM) kiekis kito nuo 41,4 iki 48,0 %, o mineraliais susijusios organinės medžiagos (MAOM) – nuo 52,0 iki 58,6 %.

Didžiausias POM kiekis nustatytas tiesioginės sėjos (NT+Š) variante (48,0 %), o mažiausias – gilaus arimo su šiaudais (GA+Š) (41,4 %). Tai rodo, kad mažiau intensyvios dirbimo sistemos, ypač taikant tiesioginę sėją, sudaro palankesnes sąlygas augalinių liekanų išsaugojimui viršutiniame dirvožemio sluoksnyje. Tuo tarpu gilus arimas, nepaisant šiaudų įterpimo, spartina organinės medžiagos mineralizaciją, todėl POM frakcijos kiekis išlieka mažesnis.

MAOM frakcijos kiekis buvo didžiausias GA+Š variante (58,6 %), o mažiausias – NT+Š (52,0 %). Šie rezultatai rodo, kad gilesnis dirvožemio apdirbimas skatina greitesnę organinės medžiagos skaidymąsi ir perėjimą į stabilesnes formas, kurios siejamos su mineralinėmis dalelėmis.

POM-C kiekis siekė nuo 0,62 iki 2,26 %. Aukščiausios reikšmės nustatytos NT+Š ir TP+Š variantuose (atitinkamai 2,26 ir 1,77 %), o mažiausios – GA_{be} ir GA+Š (0,62–0,63 %). Tai rodo, kad mažiau intensyvus dirbimas kartu su šiaudų įterpimu sudaro palankesnes sąlygas organinės anglies kaupimuisi aktyviojoje frakcijoje.

MAOM-C kiekis kito nuo 2,65 iki 4,77 %. Didesnės reikšmės nustatytos TP+Š (4,77 %) ir NT+Š (4,45 %) variantuose, lyginant su ariamais variantais. Tai leidžia teigti, kad mažesnis dirvožemio judinimas ir organinės medžiagos kaupimasis paviršiuje skatina anglies jungimąsi su mineralinėmis dalelėmis, todėl didėja ilgalaikės anglies formos.

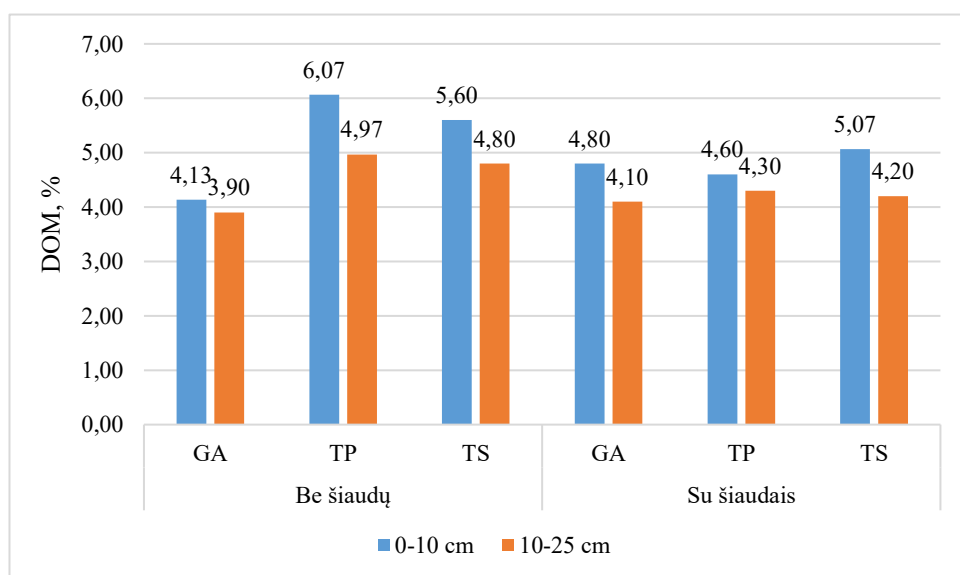
Azoto kiekiai (POM-N ir MAOM-N) parodė panašias tendencijas kaip anglis. Didesnės POM-N reikšmės nustatytos TP+Š (0,14 %) ir NT+Š (0,17 %) variantuose, o mažesnės – GA

(kontrolė) ir GA+Š (0,04–0,05 %). Panašiai ir MAOM-N kiekiai buvo aukštesni neariminio dirbimo variantuose (0,38–0,41 %), palyginti su giluminio arimo sistemomis (0,29 %).

Tai rodo, kad mažiau intensyvus žemės dirbimas ir organinių liekanų įterpimas padeda palaikyti didesnį azoto kiekį organinės medžiagos frakcijose, o tai gali būti siejama su didesne biocheminių procesų aktyvacija.

Apibendrinant galima teigti, kad mažiau intensyvios žemės dirbimo sistemos (TP+Š ir NT+Š) skatina aktyvesnę organinės medžiagos kaupimąsi tiek POM, tiek MAOM frakcijose, didindamos anglies ir azoto kiekius šiose frakcijose (3.6 lentelė). Gilus arimas, ypač be šiaudų įterpimo, lemia mažesnę aktyviųjų organinės medžiagos formų kiekį dėl spartesnės mineralizacijos ir didesnio aeracijos intensyvumo. Rezultatai rodo, kad dirbimo intensyvumo mažinimas ir organinių liekanų integravimas yra svarbūs veiksniai, didinantys organinės medžiagos stabilumą bei anglies išsilaikymą dirvožemyje, o tai turi teigiamą poveikį ilgalaikiam dirvožemio derlingumui ir tvariam anglies balansui agroekosistemoje.

Dirvožemio organinės medžiagos kiekio tyrimų rezultatai 2023 m. pateikti 3.7 paveiksle. Viršutiniame tirtu dirvožemio sluoksnyje nustatytas DOM didesnis nuo 1,1 iki 1,5 karto laukeliuose, kuriuose buvo taikyta tarpinių pasėlių sėja į neįdirbtą dirvą (TP) ir tiesioginė sėja (nulinis žemės dirbimas, TS), lyginat su giliu arimu (GA), tiek laukeliuose su šiaudais, tiek kur šiaudai buvo paskleisti. Gilesniame (10–25 cm) dirvožemio sluoksnyje nustatytos panašios tendencijos. Visuose laukeliuose kuriuose buvo taikyti mažiausio intensyvumo žemės dirbimai, nustatytas didesnis nuo 1,1 iki 1,5 karto DOM kiekis, nei giliai artuose laukeliuose (GA).

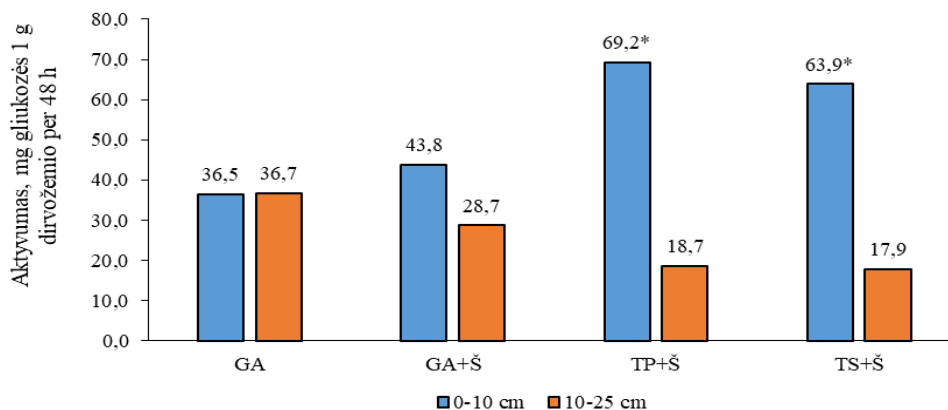


3.7 pav. Dirvožemio organinės medžiagos kiekis skirtinguose dirvožemio sluoksniuose 2023 m.

Pastaba: A veiksnys: -Š – be šiaudų (kontrolė), +Š – šiaudai susmulkinti ir paskleisti, B veiksnys GA – gilus arimas (kontrolė), TP – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais, TS – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių..

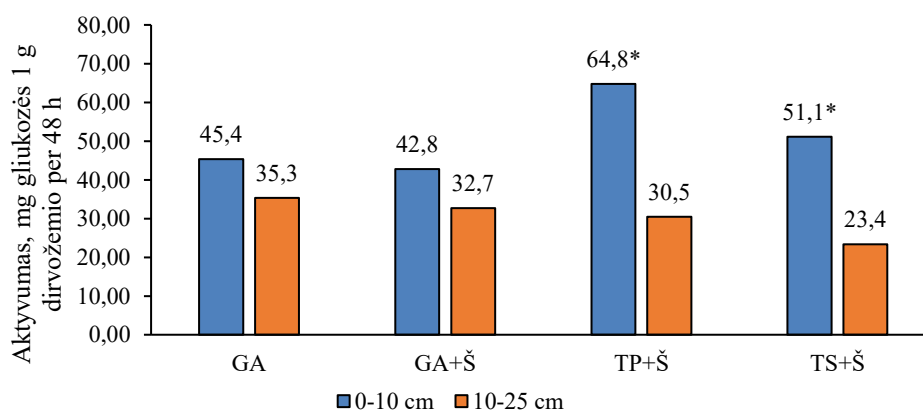
3.1.4. Dirvožemio fermentų aktyvumas

Fermento sacharazės aktyvumas. 2022 m. ilgalaikis technologijos be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais ar be jų taikymas esmingai nuo 1,5 iki 1,9 karto didino dirvožemio fermento sacharazės aktyvumą 0-10 cm armens sluoksnyje, 2023 m. nuo 1,1 iki 1,5 karto, o 2024 m. nuo 1,6 iki 1,9 karto, palyginti su giliu arimu be ir su šiaudais (3.8, 3.9, 3.10 pav.).



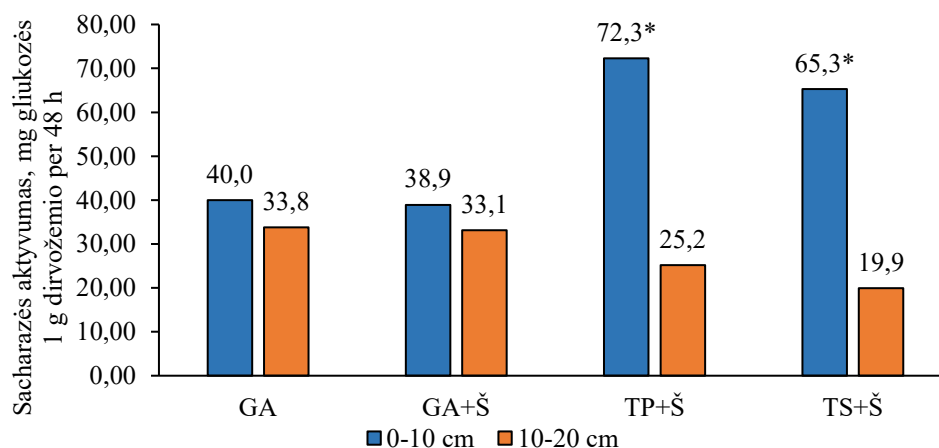
3.8 pav. Fermento sacharazės aktyvumas žieminių rapsų agrocezoje, 2022 m.

Pastaba: GA – gilus arimas be šiaudų (kontrolė), GA+Š – gilus arimas su šiaudais TP+Š – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais ir paliktais šiaudais, TS+Š – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių ir su paliktais šiaudais. Esminio skirtumo tikimybės lygis: * – $P < 0,05$ 0-10 cm armens sluoksnyje.



3.9 pav. Fermento sacharazės aktyvumas žieminių kviečių agrocezoje, 2023 m.

Pastaba: GA – gilus arimas be šiaudų (kontrolė), GA+Š – gilus arimas su šiaudais TP+Š – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais ir paliktais šiaudais, TS+Š – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių ir su paliktais šiaudais. Esminio skirtumo tikimybės lygis: * – $P < 0,05$ 0-10 cm armens sluoksnyje.

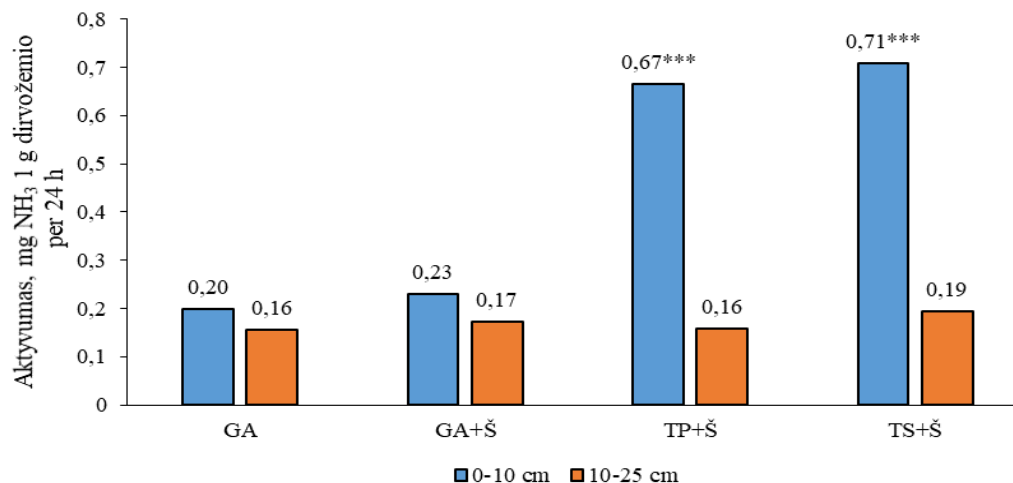


3.10 pav. Fermento sacharazės aktyvumas vasarinių miežių agrocezoje, 2024 m.

Pastaba: GA – gilus arimas be šiaudų (kontrolė), GA+Š – gilus arimas su šiaudais TP+Š – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais ir paliktais šiaudais, TS+Š – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių ir su paliktais šiaudais. Esminio skirtumo tikimybės lygis: * – $P < 0,05$ 0-10 cm armens sluoksnyje.

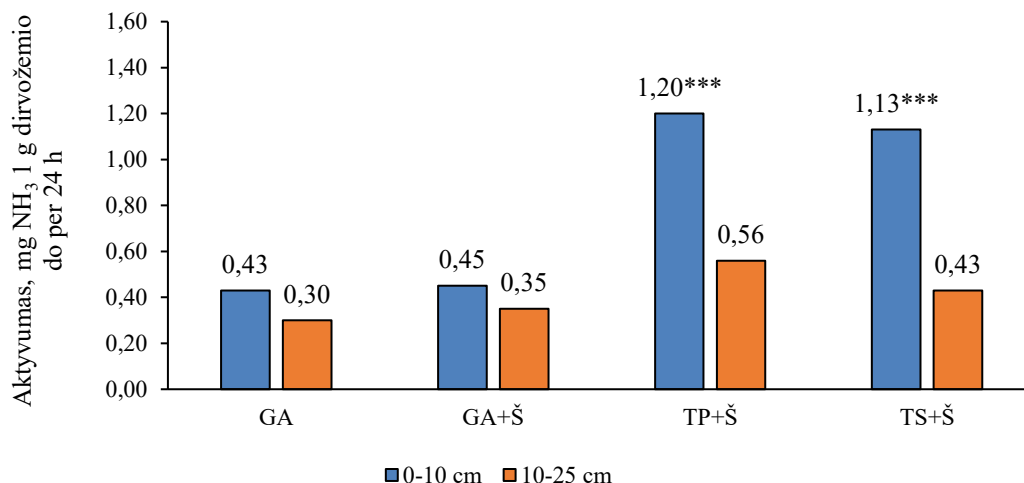
Po gilaus arimo fermento sacharazės aktyvumas 10-20 cm armens sluoksnyje nustatytas didesnis nei nederbtoje dirvoje su tarpiniais pasėliais ar be jų, tačiau neesmingai.

Fermento ureazės aktyvumas. 2022 m. nederbtoje dirvoje, tiek su tarpiniais pasėliais, tiek ir be jų, dirvožemio fermento ureazės aktyvumas 0-10 cm armens sluoksnyje nustatytas esmingai nuo 2,9 iki 3,6 karto, 2023 m. – nuo 2,5 iki 2,8 karto, o 2024 m. – nuo 3,0 iki 3,4 karto didesnis negu giliai artoje dirvoje be ir su šiaudais (3.11, 3.12, 3.13 pav.). Fermento ureazės aktyvumas 10-20 cm armens sluoksnyje skirtingai dirbtuose laukeliuose esmingai nesiskyrė.



3.11 pav. Fermento ureazės aktyvumas žieminių rapsų agroceozėje, 2022 m.

Pastaba: GA – gilus arimas be šiaudų (kontrolė), GA+Š – gilus arimas su šiaudais TP+Š – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais ir paliktais šiaudais, TS+Š – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių ir su paliktais šiaudais. Esminio skirtumo tikimybės lygis: *** – $P < 0,001$ 0-10 cm armens sluoksnyje.

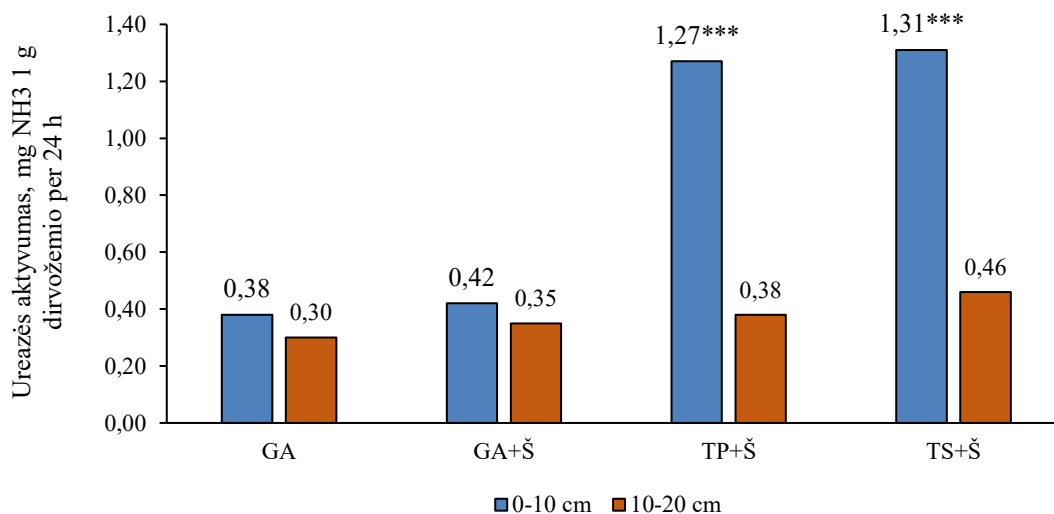


3.12 pav. Fermento ureazės aktyvumas žieminių kviečių agroceozėje, 2023 m.

Pastaba: GA – gilus arimas be šiaudų (kontrolė), GA+Š – gilus arimas su šiaudais TP+Š – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais ir paliktais šiaudais, TS+Š – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių ir su paliktais šiaudais. Esminio skirtumo tikimybės lygis: *** – $P < 0,001$ 0-10 cm armens sluoksnyje.

J. Mirzavand ir H. Asadi-Rahmani (2020) duomenimis, didžiausias fermento ureazės aktyvumas nustatytas nederbtoje dirvoje su paliktomis augalinėmis liekanomis. J. Wei ir kt. (2018) duomenimis, tarpiniai pasėliai dirvožemio fermento sacharazės aktyvumą padidino 17,7 %, o ureazės – 21,7 %, palyginti su laukeliais be tarpinio pasėlio. T. Li ir kt. (2024) duomenimis, augalų įvairovės didinimas sėjomainose ir technologijos be žemės dirbimo taikymas didino dirvožemio fermentų aktyvumą. M. Szostek ir kt. (2022) teigia, kad nederbtoje dirvoje fermentų aktyvumą labai padidina organinių trąšų naudojimas, palyginti su nederbta dirva. L. Wen ir kt. (2023)

duomenimis fermentų aktyvumas labiausiai didėjo nederbtoje dirvoje kartu panaudojus šiaudus. A. Ursu ir kt. (2025) nustatė, kad taikant beariminę technologiją dirvožemio fermentų aktyvumas padidėjo nuo 43 iki 59, palyginti su įprasta žemės dirbimo sistema.



3.13 pav. Fermento ureazės aktyvumas vasarinių miežių agrocenozeje, 2024 m.

Pastaba: GA – gilus arimas be šiaudų (kontrolė), GA+Š – gilus arimas su šiaudais TP+Š – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais ir paliktais šiaudais, TS+Š – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių ir su paliktais šiaudais. Esminio skirtumo tikimybės lygis: *** – $P < 0,001$ 0-10 cm armens sluoksnyje.

Palyginti su tradiciniu žemės dirbimu, šiaudų mulčiavimas be arimo padidino dirvožemio fermentų aktyvumą nuo 59 iki 115 % (Cengiz et al., 2025).

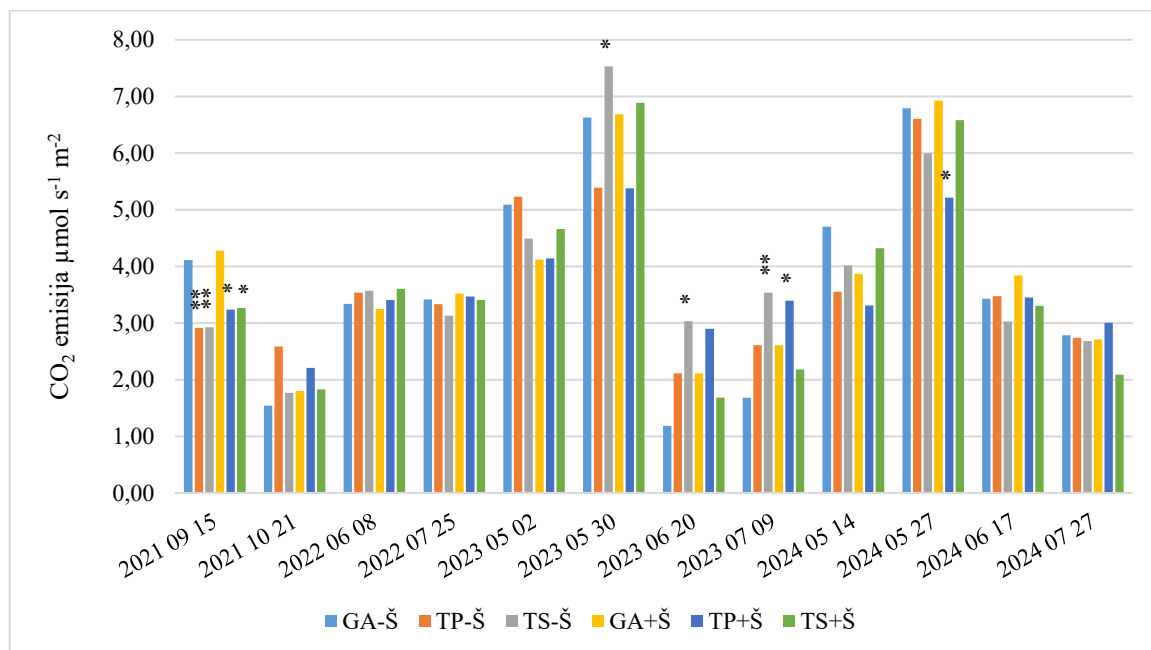
3.1.5. Dirvožemio CO₂ emisijos, temperatūra ir drėgmė

Pasaulyje dirvožemio CO₂ emisijų tyrimų gausu, tačiau rezultatai labai prieštaringi. Vieni autoriai gauna panašias CO₂ emisijas taikant tiesioginę sėją, neariminę ir įprastinę žemės dirbimą, kiti – randa didesnes CO₂ emisijas taikant tiesioginės sėjos technologiją nederbtoje žemėje, o treči teigia, kad CO₂ emisijos taikant tiesioginę sėją į nederbtą dirvą būna didesnės tik tam tikru periodu, o kitu periodu – mažesnės. Dar kiti autoriai teigia, kad iš esmės mažesnės CO₂ emisijos iš tiesioginės sėjos dirvų, lyginant su įprastai artomis dirvomis, būna trumpą periodą po žemės dirbimo.

Atlikus matavimus 1 mėn. po žieminių rapsų sėjos (2021 09 15) nustatėme (3.14 pav.), kad nederbtoje žemėje su tarpiniais pasėliais ir nederbtoje žemėje be tarpinių pasėlių CO₂ emisija buvo esmingai mažesnė. Lyginat su įprastiniu giliu žemės dirbimu, tiek laukeliuose be šiaudų, tiek ir su šiaudais CO₂ emisija buvo atitinkamai 29 ir 28 % ir 24 ir 23 % mažesnė. Tačiau, vėlesnių matavimų metu, žieminių rapsų vegetacijos pradžioje, viduryje ir pabaigoje (2021-10-21, 2022-06-08 ir 2022-07-25) CO₂ emisijos iš dirvožemio esminių skirtumų nenustatyta. Tuo metu nei tirtos žemės dirbimo sistemos, nei šiaudų panaudojimas įtakos nebeturėjo.

Žieminių kviečių vegetacijos pradžioje, viduryje ir pabaigoje, nustatytos tokios pačios tendencijos kaip ir žieminių rapsų auginimo metu.

Labai panašius tyrimų rezultatus gavo La Scala su bendraautoriais (2001). Nuo žemės dirbimo iki sėjos, kol dirva yra nepadengta naujais augalais, žemės dirbimas gali turėti reikšmingos įtakos CO₂ emisijai iš dirvos. Intensyviau dirvą purenantys ir maišantys žemės dirbimo būdai ženkliai padidina CO₂ emisijas iš dirvos pirmųjų 2 savaitžių laikotarpyje, lyginant su nederbta žeme.



3.14 pav. Dirvožemio CO₂ emisija po žemės dirbimo, vegetacijos pradžioje, viduryje ir pabaigoje 2021- 2024 m.

Pastaba: A veiksnys: -Š – be šiaudų (kontrolė), +Š – šiaudai susmulkinti ir paskleisti, B veiksnys GA – gilus arimas (kontrolė), TP – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais, TS – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių. Esminio skirtumo tikimybės lygis: * - $P \leq 0,05$; ** - $P \leq 0,01$.

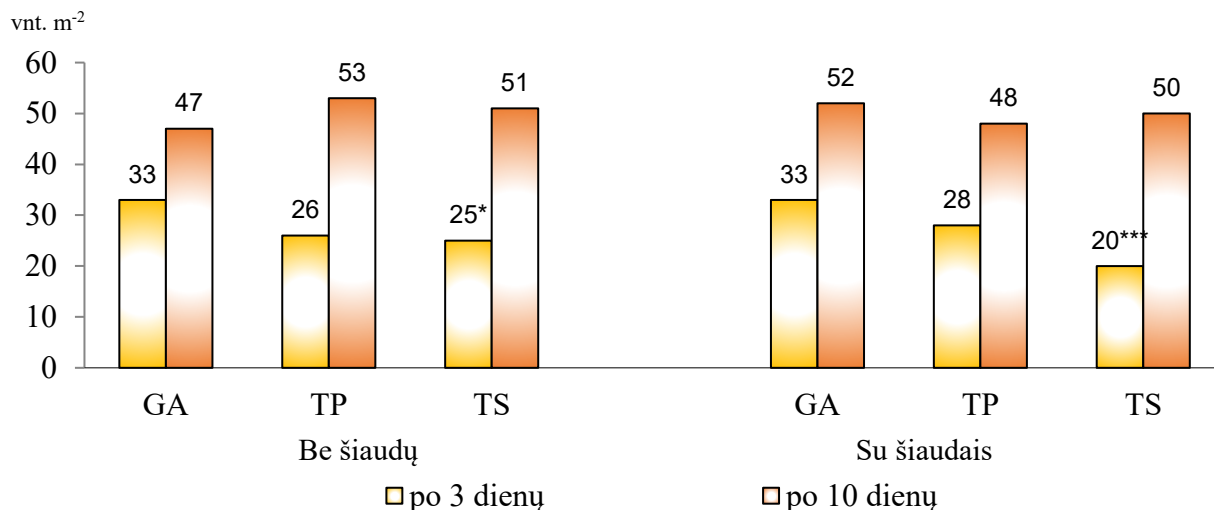
Vasarinių miežių vegetacijos metu CO₂ emisijų tendencijos yra panašios į žieminių rapsų ir kviečių. Ankstyvuoją vegetacijos periodu neariminė žemės dirbimo sistema (TP ir TS) išskyrė mažesnę CO₂ emisiją, palyginti su giluminiu arimu, tačiau vegetacijos viduryje ir pabaigoje šie skirtumai buvo neesminiai.

Kögel-Knabner et al. (2023) tyrimas taip pat rodo, kad neariminės sistemos ilgainiui mažina CO₂ emisijas tik pradinėse stadijose dėl sumažėjusio dirvožemio maišymo ir oksidacijos, tačiau augalų vegetacijos metu augalų šaknys ir organinių medžiagų apykaita tampa lemiamais emisijų veiksniais. Tai paaiškina, kodėl viduryje ir pabaigoje skirtumai tarp ariminių ir neariminių sistemų išnyksta.

Apibendrinant, šis mūsų tyrimas parodė, kad neariminė žemės dirbimo sistema ankstyvuoją vegetacijos periodu lemia mažesnę CO₂ emisiją, tačiau ilgainiui skirtumai tarp neariminio ir giluminio arimo emisijų išsilygina. Tai paaiškinama dirvožemio stabilizacija ir augalų dangos įtaka CO₂ emisijoms vegetacijos eigoje. Naujausi tyrimai, kaip Chirinda et al. (2019), Gelybó, G., (2022) ir Kögel-Knabner et al. (2023), patvirtina, kad tiesioginės sėjos ir neariminės technologijos iš pradžių mažina CO₂ emisijas dėl sumažėjusios anglies mineralizacijos, tačiau augalų augimo metu šis poveikis mažėja dėl mikrobiologinės veiklos ir šaknų sistemos poveikio.

3.1.6. Augalų produktyvumas ir derlingumas

Žieminių rapsų sudygimo rezultatai, lyginant tris skirtingas žemės dirbimo sistemas – gilų arimą (GA), neariminį žemės dirbimą su tarpiniais pasėliais (TP) ir neariminį dirbimą be tarpinių pasėlių (TS) – rodo (3.15 pav.), kad 3-čią dieną po pirmųjų daigų pasirodymo, daigų skaičius neariminėje žemėje tiek su tarpiniais pasėliais, tiek be jų buvo reikšmingai mažesnis nei gilumo arimo atveju, atitinkamai 24 % ir 39 % mažesnis ($P \leq 0,05$ ir $P \leq 0,001$). Tačiau po 10 dienų esminių skirtumų tarp grupių nebebuvo nustatyta ($P > 0,05$), kas leidžia daryti išvadą, jog žieminių rapsų sudygimas neariminėje žemėje lėtėja pradžioje, bet per tam tikrą laiką išsilygina.

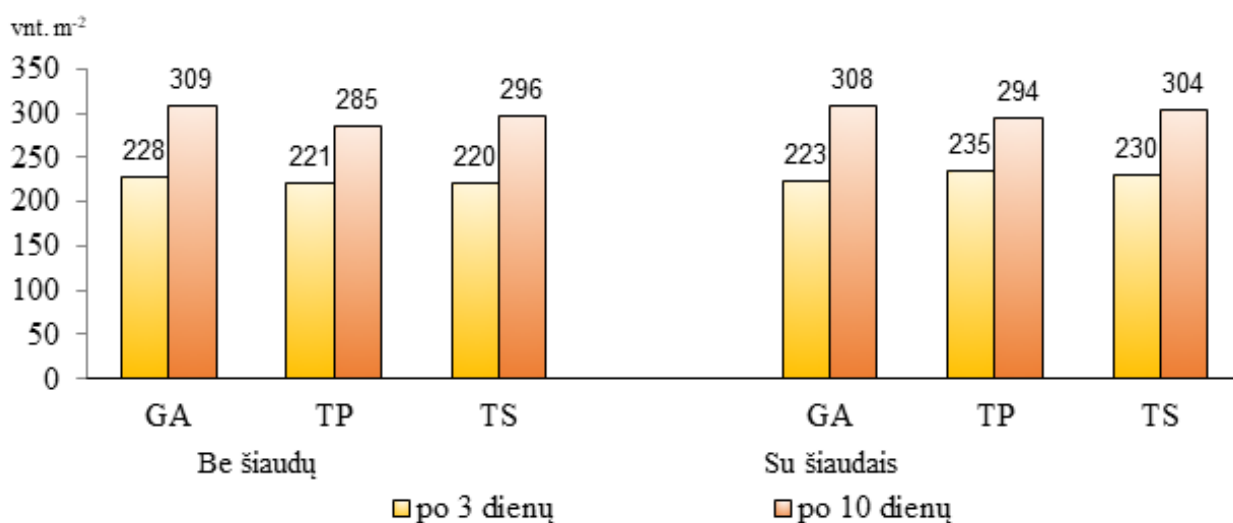


3.15 pav. Žieminių rapsų sudygimas 3-ią ir 10-ą dieną nuo dygimo pradžios

Pastaba: A veiksnys: -Š – be šiaudų (kontrolė), +Š – šiaudai susmulkinti ir paskleisti, B veiksnys GA – gilus arimas (kontrolė), TP – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais, TS – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių. Esminio skirtumo tikimybės lygis: * - $P \leq 0,05$; *** - $P \leq 0,001$.

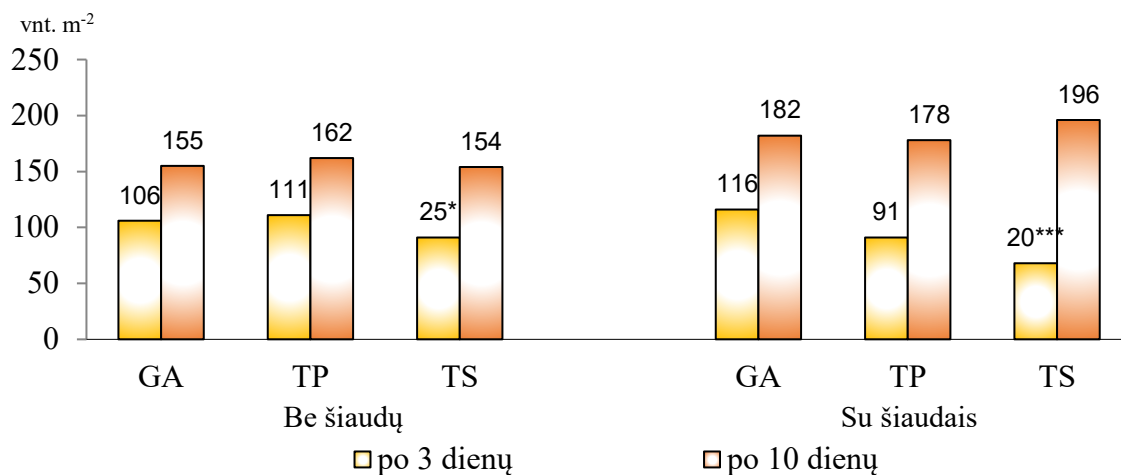
Žieminių kviečių sudygimo rezultatai, rodo, kad kviečių sudygimas buvo vienodas tiek giliame arime, tiek neariminiame dirbime (su tarpiniais pasėliais ir be jų), tiek 3-čią dieną, tiek 10-tą dieną po pirmųjų daigų pasirodymo (3.16 pav.). Šie rezultatai rodo, kad žieminiai kviečiai yra mažiau jautrūs dirbimo būdo pokyčiams ankstyvoje sudygimo stadijoje, palyginti su rapsais, ir kad neariminės žemės dirbimo technologijos neturėjo esminės įtakos daigų skaičiui. Statistiškai reikšmingų skirtumų ($P \leq 0,05$) nenustatyta. Žieminių kviečių dygimo tendencijos tiek po 3 d., tiek po 10 d. tendencingai tolygios. Manoma, kad tam įtakos galėjo turėti neariminė žemės dirbimo sėjamoji Agrisem SLY BOSS, kuri net esant sausrui ir sukietėjusiam dirvožemiui užtikrina vienodai optimalią sėklos guoliavietę tiek artoje, tiek ir dirvoje be žemės dirbimo.

Vasarinių miežių sudygimo rezultatai rodo (3.17 pav.), kad 3-čią dieną po pirmųjų daigų pasirodymo giluminis arimas (GA) lėmė reikšmingai didesnę daigų skaičių, palyginti su nearimine sistema (su ir be tarpinių pasėlių). Tačiau, po 10 dienų skirtumai tarp dirbimo sistemų tapo statistiškai nereikšmingi ($P > 0,05$). Tai rodo, kad pradžioje miežių sudygimas neariminėje dirvoje yra lėtesnis, tačiau per 10 dienų skirtumai tarp dirbimo sistemų išnyksta. Šis rezultatas patvirtina, kad dirvožemio dirbimo būdas turi tik laikiną poveikį vasarinių miežių sudygimo greičiui.



3.16 pav. Žieminių kviečių sudygimas 3-ią ir 10-ą dieną nuo dygimo pradžios

Pastaba: A veiksnys: -Š – be šiaudų (kontrolė), +Š – šiaudai susmulkinti ir paskleisti, B veiksnys GA – gilus arimas (kontrolė), TP – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais, TS – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių. Esminio skirtumo tikimybės lygis: * - $P \leq 0,05$; *** - $P \leq 0,001$.

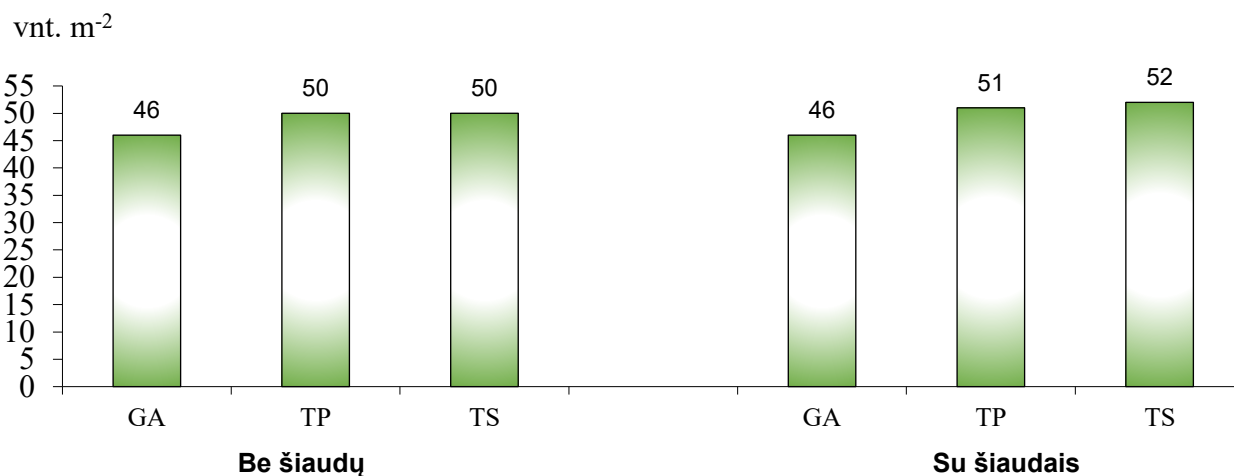


3.17 pav. Vasarinių miežių sudygimas 3-ią ir 10-ą dieną nuo dygimo pradžios

Pastaba: Pastaba: A veiksnys: -Š – be šiaudų (kontrolė), +Š – šiaudai susmulkinti ir paskleisti, B veiksnys GA – gilus arimas (kontrolė), TP – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais, TS – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių. Esminio skirtumo tikimybės lygis: * - $P \leq 0,05$; *** - $P \leq 0,001$.

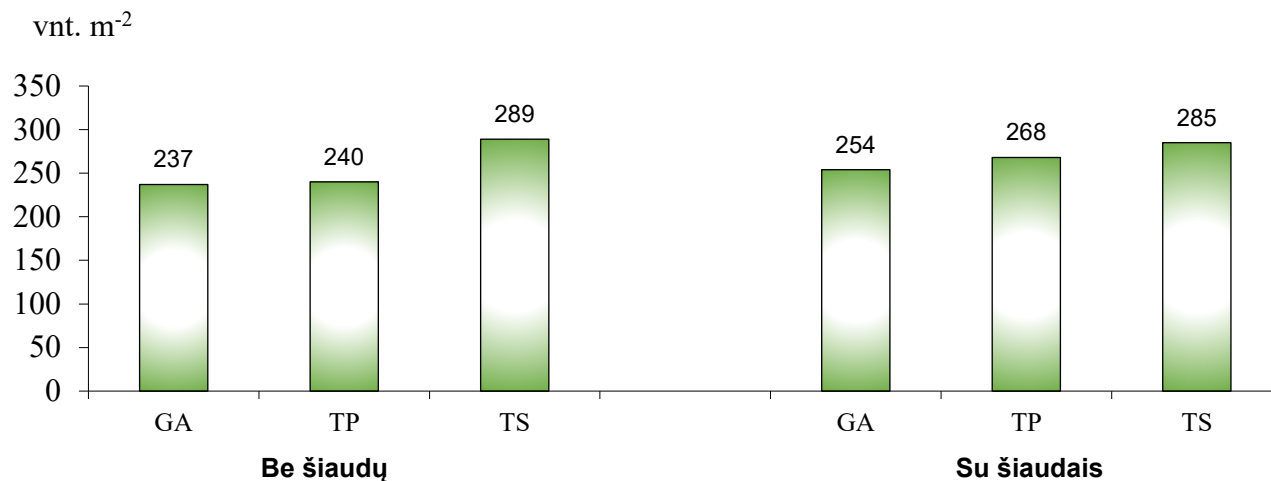
Kai kurie mokslininkai taip pat yra nustatę, kad mažesnis javų sudygimas, taikant neariminį žemės dirbimą bei nedarboje dirvoje, yra laikinas – jau po savaitės javų daigų skaičius skirtingose žemės dirbimo sistemose suvienodėja. Šie rezultatai atitinka daugelio autorių, tyrusių neariminio ir ariminio žemės dirbimo poveikį, išvadas. Wang ir kt. (2019) tyrimai parodė, kad neariminis dirbimas iš pradžių lemia mažesnį augalų daigų skaičių, tačiau po savaitės augalų daigų skaičius suvienodėja su giluminio arimo rezultatais. Panašiai ir Pittelkow et al. (2015) pastebėjo, kad neariminės technologijos dažnai lėtina sudygimą, tačiau jos nelemia ilgalaikio neigiamo poveikio augalų augimui ir produktyvumui. Taip pat verta paminėti, kad kai kurie tyrimai, tokie kaip Lal (2004), teigia, kad neariminis dirbimas, nors ir gali sulėtinti sudygimo procesą, turi ilgalaikę naudą dirvožemio sveikatai ir drėgmės sulaikymui. Šie aspektai gali turėti teigiamą poveikį augalų augimui vėlesnėse vystymosi stadijose, ypač esant sausroms ar kitoms aplinkos stresinėms sąlygoms. Šie duomenys dera su ankstesnių autorių išvadomis ir papildomai patvirtina, kad neariminės žemės dirbimo sistemos gali būti veiksmingos, ypač ilgalaikėje perspektyvoje, jei tikslas yra gerinti dirvožemio kokybę ir tvarumą.

Gilus arimas turėjo tendenciją mažinti žieminių rapsų produktyvių stiebų skaičių, tačiau esminės įtakos, palyginus su variantais be žemės dirbimo, nenustatyta (3.18 ir 3.19 pav.). Šiaudų panaudojimas taip pat neturėjo įtakos.



3.18 pav. Žieminių rapsų produktyvių stiebų skaičius 2022 m.

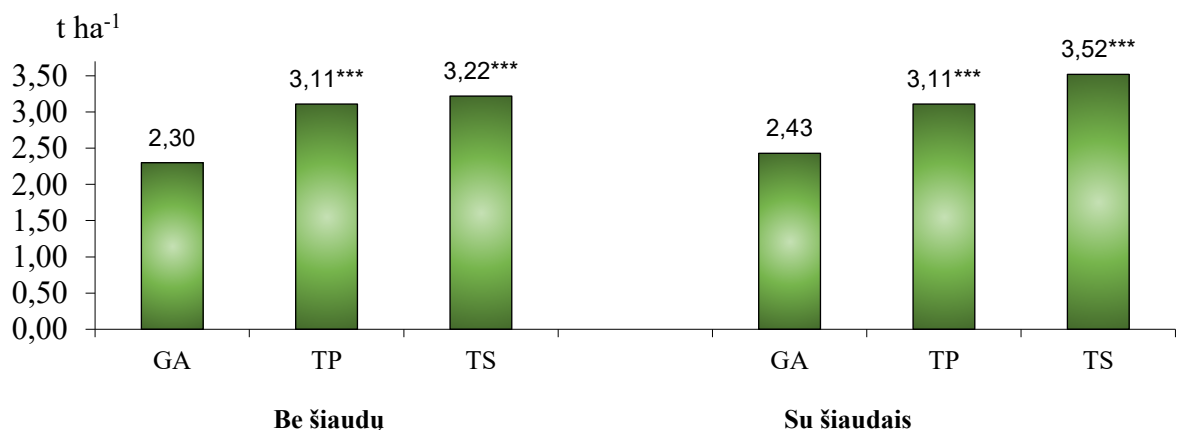
Pastaba: A veiksnys: -Š – be šiaudų (kontrolė), +Š – šiaudai susmulkinti ir paskleisti, B veiksnys GA – gilus arimas (kontrolė), TP – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais, TS – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių. Esminio skirtumo tikimybės lygis: Esminių skirtumų nėra: $P > 0,05$.



3.19 pav. Vasarinių miežių pasėlio tankumas 2024 m.

Pastaba: A veiksnys: -Š – be šiaudų (kontrolė), +Š – šiaudai susmulkinti ir paskleisti, B veiksnys GA – gilus arimas (kontrolė), TP – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais, TS – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių. Esminio skirtumo tikimybės lygis: Esminių skirtumų nėra: $P > 0,05$.

Nustatyta, kad gilus arimas, tiek fone be šiaudų, tiek ir su šiaudais, esmingai mažino žieminių rapsų derlingumą (3.20 pav.). Nedarboje žemėje su tarpiniais pasėliais derlingumas buvo atitinkamai 1,4 ir 1,3 karto didesnis, o laukeliuose be žemės dirbimo bei be tarpinių pasėlių – atitinkamai 1,4 ir 1,5 karto didesnis nei giliai artuose laukeliuose.

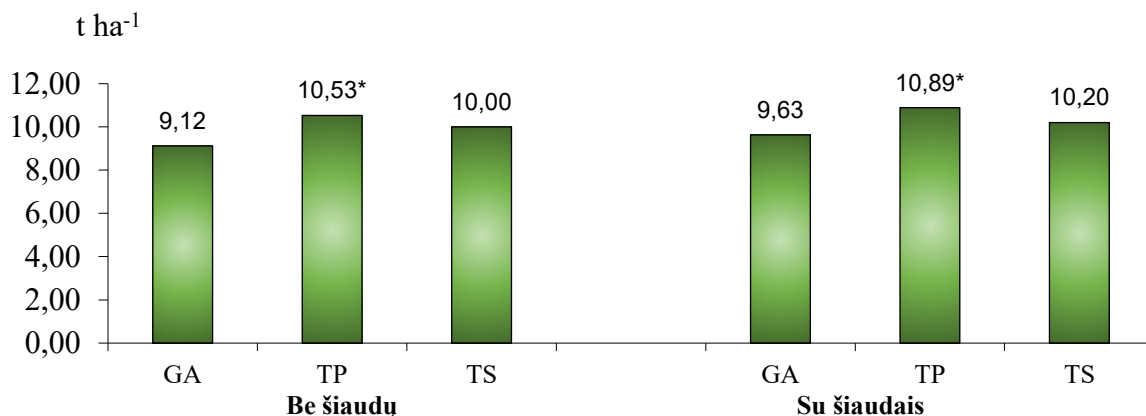


3.20 pav. Žieminių rapsų derlingumas 2022 m.

Pastaba: A veiksnys: -Š – be šiaudų (kontrolė), +Š – šiaudai susmulkinti ir paskleisti, B veiksnys GA – gilus arimas (kontrolė), TP – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais, TS – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių. Esminio skirtumo tikimybės lygis: *** - $P \leq 0.001$.

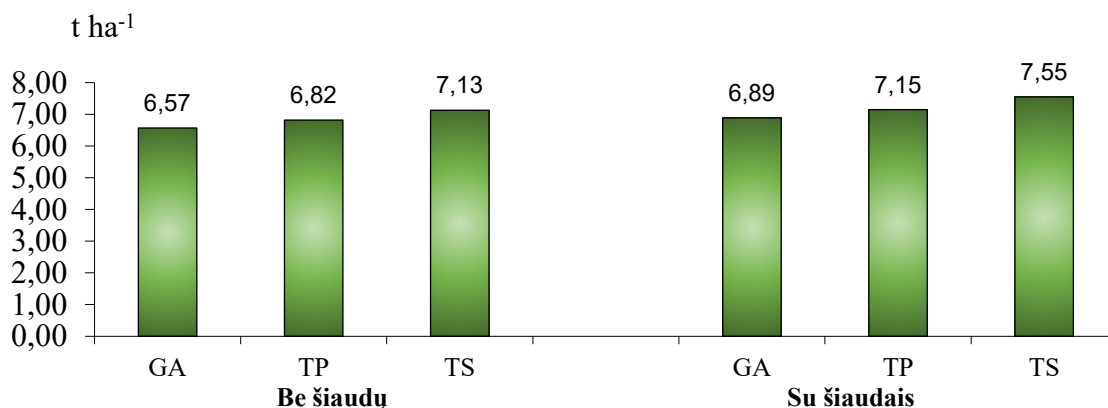
Žieminių kviečių derlingumas tiek fone be šiaudų, tiek fone su šiaudais, kur buvo taikomas gilus arimas, esmingai sumažėjo (3.21 pav.). Nedarboje žemėje su tarpiniais pasėliais derlingumas buvo atitinkamai 1,2 ir 1,1 karto didesnis, o laukeliuose be žemės dirbimo bei be tarpinių pasėlių – atitinkamai 1,1 ir 1,1 karto didesnis nei giliai artuose laukeliuose.

Vasarinių miežių derlingumas taip pat buvo reikšmingai didesnis neariminėse žemės dirbimo sistemose (TP ir TS), palyginus su giluminiu arimu (GA), kur giluminis arimas sumažino derlingumą (3.22 pav.). Neariminiai metodai be tarpinių pasėlių padidino derlingumą iki 1,1–1,5 karto.



3.21 pav. Žieminių kviečių derlingumas 2023 m.

Pastaba: A veiksnys: -Š – be šiaudų (kontrolė), +Š – šiaudai susmulkinti ir paskleisti, B veiksnys GA – gilus arimas (kontrolė), TP – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais, TS – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių. Esminio skirtumo tikimybės lygis: * - $P \leq 0.05$.



3.22 pav. Vasarinių miežių derlingumas 2024 m.

Pastaba: A veiksnys: -Š – be šiaudų (kontrolė), +Š – šiaudai susmulkinti ir paskleisti, B veiksnys GA – gilus arimas (kontrolė), TP – be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais, TS – be žemės dirbimo bei tarpinių pasėlių. Esminio skirtumo tikimybės lygis: Esminių skirtumų nėra: $P > 0.05$.

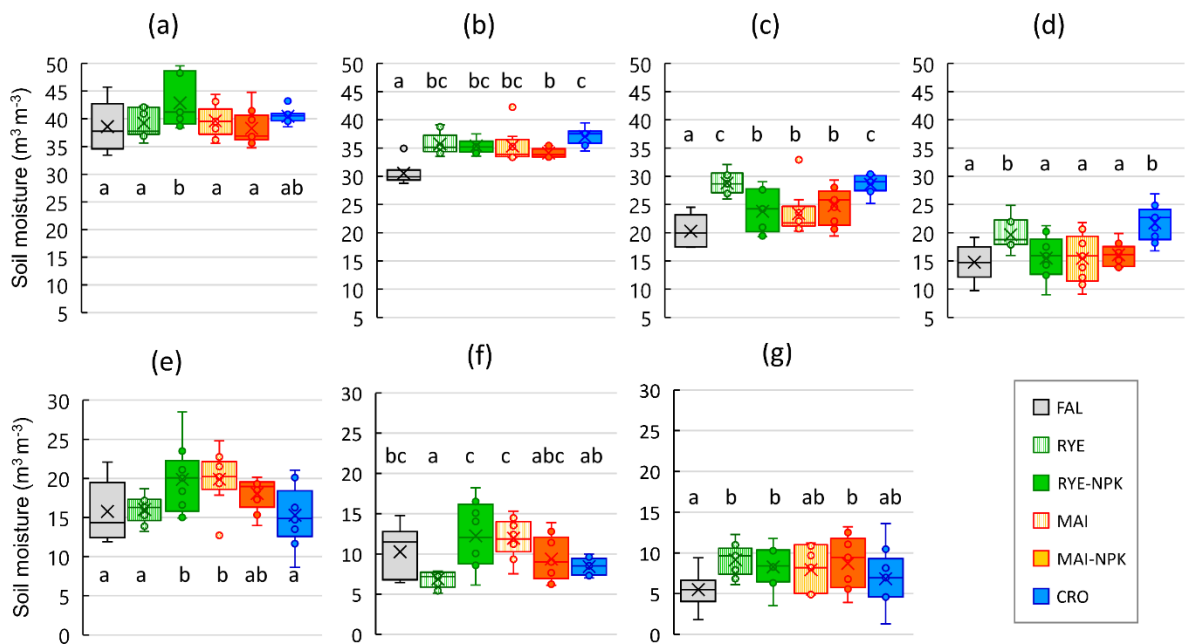
Apibendrinus tyrimo rezultatus apie derlingumą ir produktyvumą, pastebėta, kad gilus arimas dažniausiai neigiamai veikė žieminių rapsų, kviečių ir vasarinių miežių derlingumą, nors neturėjo reikšmingos įtakos pasėlio tankumui ar produktyvių stiebų skaičiui. Tai gali būti paaiškinama dirvožemio struktūros rodiklio suprastėjimu, kuris atsiranda dėl intensyvaus arimo, sukeliančio didesnę organinės medžiagos mineralizavimą ir anglies praradimą, dėl ko mažėja ilgalaikis dirvožemio derlingumas. Neariminiai metodai, ypač su tarpiniais pasėliais, leido geriau išsaugoti dirvožemio struktūrą ir drėgmę, todėl derlingumas šiuose plotuose buvo reikšmingai didesnis.

Tyrimo rezultatai rodo, kad neariminėse sistemose žieminių rapsų ir kviečių derlingumas buvo iki 1,5 karto didesnis nei gilaus arimo plotuose. Tai susiję su ilgesniu organinių medžiagų išsilaikymu dirvožemyje ir mažesniu erozijos lygiu, kas leido augalams geriau naudoti maistines medžiagas. Šiaudų įterpimas neturėjo didelės įtakos nei derlingumui, nei produktyvumui, nes pagrindinė žemės dirbimo sistema ir dirvožemio struktūros išsaugojimas buvo svarbiausi faktoriai. Apibendrinant, neariminiai žemės dirbimo metodai buvo efektyvesni didinant augalų derlingumą ir užtikrinant tvaresnę dirvožemio būklę, palyginus su giluminiu arimu, kuris dažniau mažina derlių dėl ilgalaikio organinės anglies praradimo.

3.2. II EKSPERIMENTAS: SKIRTINGO TRĘŠIMO POVEIKIS DIRVOŽEMIO ORGANINĖS MEDŽIAGOS SAVYBĖMS IR ANGLIES SEKVESTRACIJAI

3.2.1. Dirvožemio fizikinės savybės

Gauti tyrimų duomenys rodo, kad skirtingų ilgalaikių monopasėlių bei intensyvios sėjomainos taikymas turėjo didelę įtaką dirvožemio fizikinėms savybėms. Palyginus su kontroliniu nuolatinio juodojo pūdymo variantu (FAL), rugių auginimas monopasėlyje su NPK trąšomis (RYE-NPK) ir intensyvios sėjomainos taikymas CRO padidino dirvožemio vandentalpą nuo 0,386 m³ m⁻³ (3.23a pav.) iki atitinkamai 0,429 ir 0,404 m³ m⁻³.



3.23 pav. Dirvožemio vandentalpos matavimų diagramos esant pF=0,0 (a), pF=2,0 (b), pF=3,0 (c) ir pF=4,2 (d). Augalams prieinamo vandens diagramos (e), įskaitant lengvai prieinamą (f) ir sunkiai prieinamą (g). Vidurkis n = 9, skirtingos raidės žymi esminius skirtumus tarp vidurkių (pagal dispersijos analizę ir Fišerio kriterijų, p < 0,05).

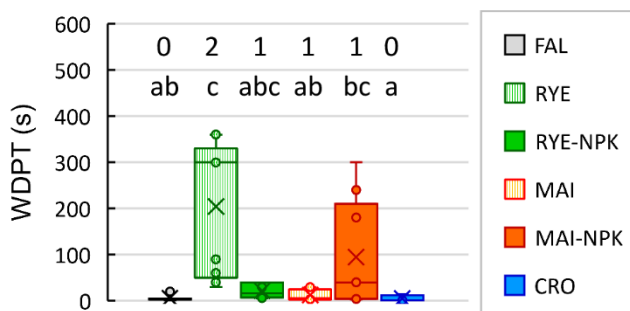
Pastaba: FAL – nuolatinis juodasis pūdydas, RYE – rugių monopasėlis be trąšų, RYE-NPK – rugių monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis, MAI – kukurūzų monopasėlis be trąšų, MAI-NPK – kukurūzų monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis, CRO – intensyvi sėjomaina.

Dirvožemio tankis nuolatiniam juodajame pūdyde (FAL) buvo 1,66 g cm⁻³, o kiti visuose kituose vykdyto eksperimento variantuose jis sumažėjo atitinkamai iki: 1,59 – rugių monopasėlyje be trąšų (RYE), 1,54 – rugių monopasėlyje su mineralinėmis NPK trąšomis (RYE-NPK), 1,63 – kukurūzų monopasėlyje be trąšų (MAI), 1,62 – kukurūzų monopasėlyje su mineralinėmis NPK trąšomis (MAI-NPK) ir 1,57 g cm⁻³, taikant intensyvią sėjomainą (CRO). Visuose eksperimento tyrimų variantuose buvo nustatytos esmingai didesnės dirvožemio lauko drėgnio vertės, lyginant su nuolatinio juodojo pūdydo (FAL) (3.23b pav.). Tai patvirtina teigiamą šviežios organinės medžiagos įterpimo poveikį dirvožemio vandens kaupimui ir išlaikymui, kas yra ypač svarbu sprendžiant pasaulines maisto saugos problemas. Padidėjęs lauko drėgmės kaupimas ir išlaikymas buvo ypač pastebimas taikant intensyvią sėjomainą (CRO), kurioje auginami įvairūs tarpiniai ankštiniai augalai ir tręšiama mėšlu. Toks vandens sulaikymo gebos padidėjimas dėl ankštinių augalų naudojimo atitinka ir kitų tyrėjų (pavyzdžiui, Liu et al. (2025)) išvadas, padarytas po 9 metus trukusio natūralios augmenijos atkūrimo eksperimento.

Nuolatinio vytimo drėgnio taške (pF=4,2, 3.23d pav.) vandens kiekis padidėjo rugių monopasėlyje be trąšų (RYE) ir taikant intensyvią sėjomainą (CRO) – atitinkamai iki 0,196 m³ m⁻³

³ ir $0,217 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ lyginant su $0,148 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ nuolatiniam juodajame pūdyme (FAL). Dėl to augalams prieinamo vandens kiekio padidėjimas (3.23e pav.) buvo pastebėtas tik rugių monopselyje su minerelinėmis NPK trąšomis (RYE-NPK) ($0,199 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) ir kukurūzų monopselyje be trąšų (MAI) ($0,198 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) variantuose, kuris buvo apie 20 % didesnis nei nuolatinio juodojo pūdymo (FAL) ($0,158 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) variante. Kalbant apie augalams prieinamą vandenį, tik rugių monopselyje be trąšų (RYE) nustatytas mažesnis lengvai prieinamo vandens kiekis (3.23f pav.), o rugių monopselyje be trąšų (RYE) ir rugių monopselyje su minerelinėmis NPK trąšomis (RYE-NPK) nustatytas didesnis sunkiai prieinamo vandens kiekis (3.23g pav.). Aptariamai augalams prieinami vandens ištekliai lemia augalų augimo ir mikrobiologinės veiklos galimybes (Or et al., 2007), kurios esant dirvožemio drėgniui, atitinkančiam $\text{pF} < 4,2$, yra stipriai slopinamos. Šios sąlygos palankios nesuskaidytų medžiagų kaupimuisi, bet ne jų veiksmingam perdirbimui į humuso junginius (Paul, 2015). Kitos galimos strategijos vandens streso poveikiui sumažinti apima tinkamų dirvožemio pagerinimo priemonių, pavyzdžiui, vandenį sugeriančių polimerų kūrimą sausros valdymui (Rattan et al., 2025; Saha et al., 2020).

Vandens lašo prasiskverbimo laiko (WDPT) sausame dirvožemyje testo medianos (t. y. potencialus hidrofobiškumas (SWR) ir faktinis hidrofobiškumas (SWR)), gautos esant skirtingiems dirvožemio drėgnumo lygiams, buvo įvertintos kaip drėkinamos, neatsparios vandeniui, t. y. SWR 0 klasės (Dekker ir Jungerius, 1990). Dirvožemio hidrofobiškumas buvo nustatytas tik esant vienam dirvožemio drėgnumo lygiui – nuolatinio vytimo drėgnio taške (3.24 pav.).



3.24 pav. Dirvožemio atsparumas vandeniui (hidrofobiškumas), nurodytas pagal vandens lašo įsiskverbimo laiko (WDPT) bandymą (dėžutės diagramos), kai dirvožemio drėgnumas lygus nuolatiniam vytimo drėgniui. Vidutinė vertė $n = 45$, skaičiai nurodo SWR klases, o skirtingos raidės nurodo reikšmingus skirtumus, nustatytus pagal Kruskalio–Walliso testą ($\alpha < 0,05$).

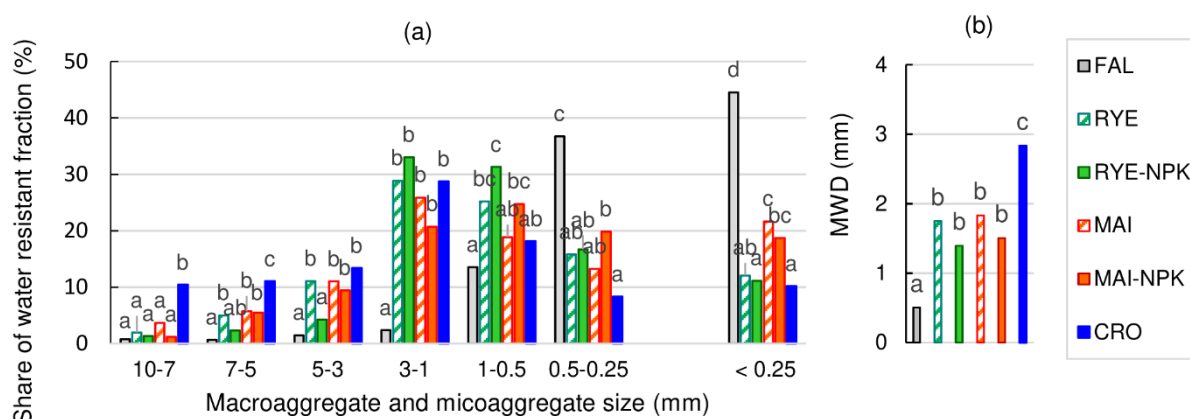
Pastaba: FAL – nuolatinis juodasis pūdyimas, RYE – rugių monopselis be trąšų, RYE-NPK – rugių monopselis su minerelinėmis NPK trąšomis, MAI – kukurūzų monopselis be trąšų, MAI-NPK – kukurūzų monopselis su minerelinėmis NPK trąšomis, CRO – intensyvi sėjomaina.

Analizuojami dirvožemio mėginiai pasižymėjo atsparumo vandeniui įvairove (3.24 pav.). Pažymėtina, kad drėkinimo 0 klasė buvo nustatyta nuolatinio juodojo pūdymo (FAL) ir intensyvios sėjomainos (CRO) dirvožemio mėginiuose. Ilgalaikiame monopselyje hidroforbiškumas (SWR) padidėjo: iki 1 klasės – rugių monopselyje su minerelinėmis NPK trąšomis (RYE-NPK), kukurūzų monopselyje be trąšų (MAI) ir kukurūzų monopselyje su minerelinėmis NPK trąšomis (MAI-NPK), o iki 2 klasės (t. y., stipriai atstumiant vandenį) – buvo nustatyta rugių monopselyje be trąšų (RYE), kur mediana buvo lygi 300 s. Tačiau, rugių monopselyje be trąšų (RYE) ir kukurūzų monopselyje su minerelinėmis NPK trąšomis (MAI-NPK) buvo nustatytas labai platus Vandens lašo prasiskverbimo laiko (WDPT) diapazonas.

Dėl dažnų sausrų pastaruoju metu daugelyje dirvožemių padidėjo jų hidroforbiškumas (SWR) (Li et al., 2023; Davis ir Park, 2024). Tai lemia dirvožemyje esančio prieinamo vandens kiekį, jo nuotėkio susidarymą ir geomorfologinius procesus. Paprastai dirvožemio hidroforbiškumas (SWR) priklauso nuo dirvožemyje esančios organinės medžiagos tipo, kadangi organinė medžiaga ir sukelia vandens hidroforbiškumą. Organinės medžiagos dalelių sumaišymas

su mineralinėmis dirvožemio dalelėmis (DeBano, 1981; Popović ir Cerdà, 2023; Hewelke et al., 2024) ir bioanglies priedais (Šurda et al., 2024) gali sukelti stiprų vandens atstūmimą, o atsparumas drėgmei gali padidėti dėl hidrofobinių mikrobinių produktų, dengiančių mineralines dirvožemio daleles (Bond ir Harris, 1964; Deng et al., 2021).

Esmingai didesnis vandeniui atsparių vidutinio skersmens makroagregatų kiekis buvo nustatytas intensyvios sėjomainos (CRO) dirvožemio mėginiuose (3.25b pav.), o mažiausias – nuolatinio juodojo pūdymo (FAL) dirvožemyje. Intensyvios sėjomainos (CRO), derintos su tręšimu, dirvožemiui buvo būdingas didesnis skersmens vandeniui atsparių makroagregatų (3.25a pav.) susidarymas, o taip pat ir mažesnis polinkis suirti į mažesnius makroagregatus ir mikroagregatus, lyginant su monopasėlių ir nuolatinio juodojo pūdymo (FAL) dirvožemiu. Pastarajame tyrimų variante dirvožemis turėjo 4 kartus didesnę < 0,25 mm dalelių frakcijos dalį, lyginant su rugių monopasėliu ir intensyvia sėjomaina ir daugiau nei dvigubai didesnę, lyginant su kukurūzų monopasėlio dirvožemiu. Kumar ir kt. (2017) nustatė, kad didelis auginamų kukurūzų tankis 9 % sumažino makroagregatų kiekį dirvožemyje, lyginant su nuolatinio juodojo pūdymo, tačiau tai neatspindi mūsų tyrimo. Panašiai kaip Zheng ir kt. (2023), mes pastebėjome teigiamą sėjomainos poveikį dirvožemio granulimetrinių dalelių agregacijai.



3.25 pav. Dirvožemio makroagregatų ir mikroagregatų pasiskirstymas (a) ir vandeniui atsparių makroagregatų vidutinis skersmuo (MWD) (b) analizuotuose variantuose. Skirtingos raidės žymi esminius skirtumus (pagal dispersijos analizę ir Fišerio kriterijų, $p < 0,05$).

Pastaba: FAL – nuolatinis juodasis pūdymas, RYE – rugių monopasėlis be trąšų, RYE-NPK – rugių monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis, MAI – kukurūzų monopasėlis be trąšų, MAI-NPK – kukurūzų monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis, CRO – intensyvi sėjomaina.

3.2.2. Dirvožemio agrocheminės savybės

Žiemiųjų rugių pasėliuose skirtinguose monopasėliuose, intensyvioje sėjomainoje ir nuolatiname juodajame pūdyme įvertinus dirvožemio organinės anglies kiekį esmingai mažiau nustatyta juodajame nuolatiname pūdyme nuo 38,05 iki 47,37 proc. lyginant su rugių monopasėliais ir intensyvia sėjomaina (3.7 lentelė).

Suminio azoto kiekis esmingai mažesnis nustatytas nuolatiname juodajame pūdyme nuo 30,75 iki 38,13 proc. lyginant su intensyvia sėjomaina ir žiemiųjų rugių monopasėliais. Įvertinus suminio fosforo kiekį esminių skirtumų tarp tiriamų variantų nenustatyta.

Įvertinus kukurūzų monopasėlių, intensyvios sėjomainos ir nuolatinio juodojo pūdymo poveikį dirvožemio organinei angliai nustatyta, kad intensyvioje sėjomainoje DOA nustatyta esmingai daugiau 38,78 proc. lyginant su monopasėliu be trąšų ir be herbicidų, ir esmingai daugiau 15,89 proc. lyginant su monopasėliu su trąšomis ir herbicidais (3.8 lentelė). Nuolatiname juodajame pūdyme DOA nustatyta esmingai mažiau nuo 22,22 iki 52,38 proc. lyginant su monopasėliais ir intensyvia sėjomaina.

3.7 lentelė. Agrocheminiai dirvožemio rodikliai žieminių rugių pasėlyje, 2023 m.

Rodikliai	Sėjomainos			
	NJP	Monopasėlis be TH	Monopasėlis su TH	Intensyvi
Judrusis fosforas P_2O_5 , mg kg ⁻¹	158,67 a	91,33 a	149,67 a	144,00 a
Suminis fosforas P, mg kg ⁻¹	205,87 a	319,33 a	203,00 a	150,87 a
Suminis kalis K, mg kg ⁻¹	3913,33 b	3910,00 b	3086,67 a	3220,00 ab
Suminis azotas N, mg kg ⁻¹	773,33 a	1250,00 b	1240,00 b	1116,67 b
C/N santykis	9,67 a	10,33 a	10,67 a	10,00 a
pH	7,33 c	7,13 b	6,90 a	6,83 a
Dirvožemio organinės medžiagos DOM, %	1,43 a	2,63 c	2,53 bc	2,20 b
Mikrobiologinis aktyvumas mg N kg ⁻¹	40,33 a	54,33 a	55,67 a	49,33 a
Katjonų mainų geba CEC, mekv kg ⁻¹	97,00 b	118,33 d	108,67 c	86,33 a
KMG pasotinimas, %	100 a	100 a	100 a	100 a
Ca- pasotinimas, %	88,00 ab	90,67 b	89,33 ab	86,67 a
Mg- pasotinimas, %	8,57 b	6,13 a	7,33 ab	9,13 b
K- pasotinimas, %	3,00 b	2,60 b	2,93 b	3,80 a
Na- pasotinimas, %	0,53 a	0,57 a	0,53 a	0,60 a
H- pasotinimas, %	0,1 a	0,1 a	0,1 a	0,1 a
Al- pasotinimas, %	0,1 a	0,1 a	0,1 a	0,1 a
Judrusis kalis, K_2O , mg kg ⁻¹	102,33 a	108,33 a	112,00 a	16,67 a
Dirvožemio organinė anglis DOA, %	0,70 a	1,33 c	1,30 bc	1,13 b
Humusas, %	1,20 a	2,67 b	2,20 b	1,97 b

Pastaba: Tarp reikšmių stulpeliuose, pažymėtų ne tomis pačiomis raidėmis, yra esminiai skirtumai ($P < 0,05$). NJP – nuolatinis juodasis pūdymas, Mono be TH – monopasėlis be trąšų ir herbicidų (kontrolė), Mono su TH – monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis ir herbicidais, Intensyvi – intensyvi sėjomaina su mineralinėmis ir organinėmis trąšomis bei ankštiniais augalais.

Suminio azoto intensyvioje sėjomainoje nustatyta esmingai daugiau nuo 27,25 iki 33,09 proc. lyginant su monopasėliais ir 43,55 proc. lyginant su nuolatinio juodojo pūdymu.

Suminio fosforo kiekis nustatytas esmingai didesnis intensyvioje sėjomainoje – 68,34 ir 62,44 proc. lyginant su monopasėliais, o juodajame pūdyje suminio fosforo nustatyta 61,28 proc. esmingai mažiau lyginant su intensyvia sėjomaina.

Esminių skirtumų, vertinant suminio kalio kiekius tarp tiriamų variantų, nenustatyta.

3.8 lentelė. Agrocheminiai dirvožemio rodikliai kukurūzų pasėlyje, 2023 m.

Rodikliai	Sėjomainos			
	NJP	Monopasėlis be TH	Monopasėlis su TH	Intensyvioji
Judrusis fosforas P_2O_5 , mg kg ⁻¹	158,67 a	121,67 a	146,67 a	230,00 a
Suminis fosforas P, mg kg ⁻¹	205,87 a	168,33 a	199,67 a	531,67 b
Suminis kalis K, mg kg ⁻¹	3913,33 a	3266,67 a	3526,67 a	2500,00 a
Suminis azotas N, mg kg ⁻¹	773,33 a	916,67 ab	996,67 b	1370,00 c
C/N santykis	9,67 a	10,00 ab	11,00 b	10,33 ab
pH	7,33 b	7,13 ab	7,13 ab	6,93 a
Dirvožemio organinės medžiagos DOM, %	1,43 a	1,70 ab	2,13 b	2,77 c
Mikrobiologinis aktyvumas mg N kg ⁻¹	40,33 a	54,00 a	44,00 a	56,33 a
Katijonų mainų geba CEC, mekv kg ⁻¹	97,00 a	93,00 a	103,00 a	109,67 a
KMG pasotinimas, %	100 a	100 a	100 a	100 a
Ca- pasotinimas, %	88,00 a	90,67 a	90,00 a	88,00 a
Mg- pasotinimas, %	8,57 a	6,27 a	6,67 a	8,50 a
K- pasotinimas, %	3,00 a	2,77 a	7,77 a	3,23 a
Na- pasotinimas, %	0,53 a	0,50a	0,53 a	0,53 a
H- pasotinimas, %	0,1 a	0,1 a	0,1 a	0,1 a
Al- pasotinimas, %	0,1 a	0,1 a	0,1 a	0,1 a
Judrusis kalis, K_2O , mg kg ⁻¹	102,33 a	92,00 a	100,00 a	126,00 a
Dirvožemio organinė anglis DOA, %	0,70 a	0,90 ab	1,07 b	1,47 c
Humusas, %	1,20 a	1,55 ab	1,84 b	2,53 c

Pastaba: Tarp reikšmių stulpeliuose, pažymėtų ne tomis pačiomis raidėmis, yra esminiai skirtumai ($P < 0,05$). NJP – nuolatinis juodasis pūdymas, Mono be TH – monopasėlis be trąšų ir herbicidų (kontrolė), Mono su TH – monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis ir herbicidais, Intensyvi – intensyvi sėjomaina su mineralinėmis ir organinėmis trąšomis bei ankštiniais augalais.

Palyginti su pūdymu, tiek rugių, tiek kukurūzų monokultūros auginimas prisidėjo prie bendros organinės anglies kiekio padidėjimo, o tai ypač išryškėjo mėšlo tręštų kukurūzų monokultūros ir ankštinių augalų tręšimo atveju (3.9 lentelė). Tačiau, kalbant apie dirvožemį, įdirbtą be tręšimo (be trąšų ir be herbicidų), mėšlo įterpimas su ankštinėmis kultūromis statistiškai reikšmingai padidino bendrą organinės anglies kiekį tik kukurūzų monokultūros atveju. Mėšlo ir ankštinių augalų naudojimas abiem pasėliams padidino tirpiosios organinės anglies kiekį. Nebuvo nustatyta aiškių statistinių priklausomybių tarp dirvožemio organinės medžiagos trupmeninės sudėties, tačiau pūdymuose buvo žymiai mažesnė humino dalis. Mėšlo ir ankštinių augalų naudojimas abiejuose pasėliuose sumažino humino dalį humusinėse medžiagose, tačiau dėl tokio tvarkymo nesumažėjo bendras humino kiekis, išreikštas g kg⁻¹.

3.9 lentelė. Bendros organinės anglies skirtumai ir dirvožemio organinės medžiagos frakcijos žieminių rugių monopasėliuose, intensyvioje sėjomainoje ir nuolatiniam juodajame pūdyme

Variantai	Bendra organinė anglis	Tirpioji organinė anglis	Huminės rūgštys	Fulvinės rūgštys	Huminas	
	g kg ⁻¹		C% in TOC			g kg ⁻¹
Rugių monopasėlis be TH	11.6 ^{bc}	0.17 ^b	42.0 ^{ab}	19.1 ^{ab}	28.1 ^b	3.25
Rugių monopasėlis su TH	13.0 ^c	0.17 ^{bc}	41.6 ^{ab}	17.8 ^a	28.1 ^b	3.65
Intensyvi	12.1 ^{bc}	0.21 ^{cd}	34.2 ^a	28.8 ^b	24.7 ^{ab}	2.93
NJP	8.5 ^a	0.12 ^a	47.6 ^b	25.6 ^{ab}	14.1 ^a	1.20
Kukurūzų monopasėlis be TH	9.8 ^{ab}	0.15 ^{ab}	39.2 ^{ab}	25.4 ^{ab}	22.6 ^{ab}	2.17
Kukurūzų monopasėlis su TH	11.3 ^{bc}	0.16 ^b	43.1 ^{ab}	16.5 ^b	27.8 ^b	3.13
Intensyvi	17.5 ^d	0.22 ^d	47.6 ^b	24.6 ^{ab}	20.1 ^{ab}	3.63

Pastaba: ėminiai išanalizuoti Vakarų Pomeranijos universitete, Lenkijoje. Tarp reikšmių stulpeliuose, pažymėtų ne tomis pačiomis raidėmis, yra esminiai skirtumai ($P < 0,05$). NJP – nuolatinis juodasis pūdymas, Mono be TH – monopasėlis be trąšų ir herbicidų (kontrolė), Mono su TH – monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis ir herbicidais, Intensyvi – intensyvi sėjomaina su mineralinėmis ir organinėmis trąšomis bei ankštiniais augalais.

3.2.3. Dirvožemio organinės medžiagos sankaupos ir stabilumas

Žemės ūkio paskirties žemėje bendrosios organinės anglies (TOC) kiekis yra nulemtas po derliaus nuėmimo dirvožemyje pasiliekančių organinių liekanų patekimu, tręšimo ir organinių medžiagų skilimo mikrobiologinės biomasės veikimu, todėl tirti skirtingi žemdirbystės metodai turėjo didelę įtaką bendrosios organinės anglies (TOC) kiekiui (3.10 lentelė). Nuolatiniam juodajame pūdyme (FAL) ir kukurūzų monopasėlyje be trąšų (MAI) dirvožemis pasižymėjo esmingai mažesniu organinio anglies kiekiu (atitinkamai 8,45 ir 8,46 g kg⁻¹) palyginti su kitais eksperimento tyrimų variantais. Didžiausias šio rodiklio padidėjimas (iki 17,48 g kg⁻¹) buvo nustatytas taikant intensyvią sėjomainą (CRO). Sėjomaina turėjo įtakos stabilių humusinių medžiagų, daugiausia humuso rūgščių, susidarymui. Šios frakcijos dalis bendrosios organinės anglies (TOC) sankaupoje esmingai padidėjo (iki 48,51 %) taikant intensyvią sėjomainą (CRO), palyginus (iki 37,26 % TOC) su nuolatinio juodojo pūdymo (FAL).

3.10 lentelė. Bendrosios organinės anglies kiekis ir humuso medžiagų frakcinė sudėtis

Variantas	TOC g kg ⁻¹	FF	HA	FA	HUM	HA/FA
		TOC, %				
FAL	8.45 a	12.76 b	37.26 a	34.76 bc	14.11 a	1.11 a
RYE	13.33 d	10.75 b	42.00 a	22.73 bc	24.52 b	1.85 ab
RYE-NPK	13.00 cd	12.56 b	41.60 a	17.76 a	28.08 b	2.35 b
MAI	8.46 ab	13.32 b	39.53 a	23.76 bc	21.94 ab	1.72 ab
MAI-NPK	11.27 bc	12.54 b	39.99 a	19.63 bc	27.85 b	2.06 ab
CRO	17.48 e	4.14 a	48.51 b	26.66 c	20.70 ab	1.87 ab

FF – mažos molekulinės masės frakcijos; HA – huminės rūgštys; FA – fulvo rūgštys; HUM – huminas. Skirtingos raidės žymi esminius skirtumus (pagal dispersijos analizę ir Fišerio kriterijų, $p < 0,05$).

Pastaba: FAL – nuolatinis juodasis pūdymas, RYE – rugių monopasėlis be trąšų, RYE-NPK – rugių monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis, MAI – kukurūzų monopasėlis be trąšų, MAI-NPK – kukurūzų monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis, CRO – intensyvi sėjomaina.

Organinių medžiagų stabilioji dalis yra sekvestruojama dirvožemyje (De Mastro et al., 2019), todėl labai svarbu skatinti tokius augalų auginimo metodus, kurie lemia tinkamą humifikacijos kryptį. Augalų liekanų kokybė ir žemės ūkio praktikos daro įtaką mikroorganizmų metabolizmui, skatindamos arba mažindamos anglies sekvestracijos potencialą (Guo et al., 2025; Zhang et al., 2022). Guo et al. (2025) nustatė, kad ankštinių augalų auginimas padidino dirvožemio mikroorganizmų biomasę ir anglies naudojimo efektyvumą, tačiau sumažino mikroorganizmų kvėpavimo parametrus, o tai lėmė didesnį anglies sekvestracijos potencialą. Mūsų eksperimente gauti rezultatai patvirtina stebėjimus, kad intensyvi sėjomaina su ankštiniais augalais (CRO) padidina bendrosios organinės anglies (TOC) kiekį ir skatina anglies sekvestracijos potencialą (Wang ir Kuzyakov, 2024). Huminių rūgščių (HA) dalies padidėjimas sutapo su mažos molekulinės masės huminių medžiagų (FF) sumažėjimu. Tai gali rodyti, kad taikoma sėjomainos praktika skatina palankias sąlygas formuoti medžiagas su didesniu polimerizacijos laipsniu (HA). Verta paminėti ir humino (HUM) dalies padidėjimą (iki 24,52 % TOC) rugių monokultūroje be trąšų (RYE), rugių monokultūroje su minerelinėmis NPK trąšomis (RYE-NPK) (iki 28,08 % TOC) ir kukurūzų monokultūroje su minerelinėmis NPK trąšomis (MAI-NPK) (iki 27,85 % TOC), palyginus su nuolatinio juodojo pūdymo (FAL) (iki 14,11 % TOC). Tai gali būti susiję su mikroorganizmų metabolizmo pokyčiais taikomoje auginimo praktikoje ir gali skatinti mikroorganizmų biomasės, kuri efektyviai susijungusi su dirvožemio mineralais, kaupimąsi (Zhang et al., 2022).

Humino (HUM) elementinė sudėtis pateikta 3.11 lentelėje. Analizuotų huminų molinis santykis buvo skirtingas, todėl galima daryti tam tikras išvadas apie jų struktūrą. Manoma, kad mažesnis huminių medžiagų H/C ir O/C santykis rodo didesnę aromatiškumą ir kondensaciją (Piccolo, 2001; Rice ir McCarty, 1999), o tai reiškia ir didesnę atsparumą mikrobiniam skilimui. Paprastai tai parodo senesnę, labiau apdorotą organinę medžiagą. Dažniausiai huminas (HUM) turi mažiausią H/C santykį tarp huminių medžiagų dėl didelio aromatinio anglies kiekio ir intensyvios kryžminės jungties bei molekulinės agregacijos.

3.11 lentelė. Skirtingose žemdirbystės sistemose (variantuose) iš dirvožemio mėginių išskirto humino elementinė sudėtis.

Variantai	pelenai %	C	N	H	S	O	H/C	O/C	C/N
		Atominė masė %							
FAL	73.61	31.0 a	1.0 a	40.9 a	5.4 c	21.6 cd	1.32 ab	0.7 c	29.6 e
RYE	52.75	37.7 c	1.4 a	44.2 ab	0.2 a	16.6 bc	1.17 a	0.4 b	27.7 bc
RYE-NPK	70.00	36.8 c	1.4 a	48.2 b	5.4 c	8.3 a	1.31 ab	0.2 a	27.0 b
MAI	73.48	30.1 a	1.1 ab	46.7 b	0.4 a	21.7 cd	1.56 cd	0.7 c	27.8 bc
MAI-NPK	60.22	33.7b	1.2 bc	48.2 b	1.7 b	15.1 b	1.43 bc	0.4 b	28.9 de
CRO	63.10	29.4 a	1.2 c	42.2 a	2.3 b	24.9 d	1.44 bc	0.8 c	24.2 a

Elementinė sudėtis nurodyta atominė procentine dalimi nuo pelenų neturinčios masės. Skirtingos raidės žymi esminius skirtumus (pagal dispersijos analizę ir Fisherio kriterijų, $p < 0,05$)

Pastaba: FAL – nuolatinis juodasis pūdymas, RYE – rugių monokultūra be trąšų, RYE-NPK – rugių monokultūra su minerelinėmis NPK trąšomis, MAI – kukurūzų monokultūra be trąšų, MAI-NPK – kukurūzų monokultūra su minerelinėmis NPK trąšomis, CRO – intensyvi sėjomaina.

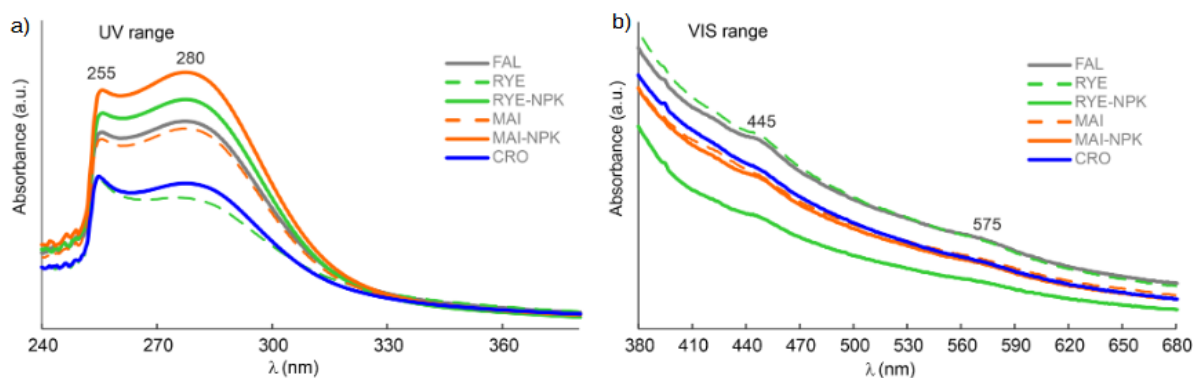
Huminas (HUM), izoliuotas iš dirvožemio rugių monokultūroje be trąšų (RYE), nuolatiname juodajame pūdyme (FAL) ir rugių monokultūroje su minerelinėmis NPK trąšomis (RYE-NPK), lyginant su kitais mėginiais, pasižymėjo mažesniu H/C santykiu, o tai reiškia didesnę aromatiškumą ir stabilesnes, kondensuotas struktūras. Tai paprastai rodo, kad jie yra atsparesni mikrobiniam skilimui, o tai prisideda prie ilgalaikės anglies sekvestracijos. Didesnės H/C vertės, nustatytos humine (HUM) iš dirvožemio kukurūzų monokultūroje be trąšų (MAI), kukurūzų monokultūroje su minerelinėmis NPK trąšomis (MAI-NPK) ir taikant intensyvią sėjomainą (CRO), gali rodyti santykinai mažiau kondensuotą aromatinę struktūrą arba skirtingus humifikacijos kelius, atspindinčius organinių medžiagų įvedimo, mikrobų aktyvumo ir dirvožemio sąlygų skirtumus skirtingose žemėnaudose.

O/C santykio tendencija, kurio mažesnės vertės taip pat rodo didesnę kondensavimąsi, atsparumą cheminėms medžiagoms ir didesnę hidrofobiškumą, buvo šiek tiek kitokia. Struktūrinės savybės, atsirandančios dėl H/C ir O/C santykių, atitiko humino (HUM), išskirto iš dirvožemio rugių monopasėlyje be trąšų (RYE) ir rugių monopasėlyje su minerelinėmis NPK trąšomis (RYE-NPK) savybes, kurios rodė mažiausias vertes. Tačiau minėtos struktūrinės savybės nebuvo patvirtintos huminui (HUM), išskirtam iš dirvožemio nuolatiniam juodajame pūdyme (FAL) ir kukurūzų monopasėlyje be trąšų (MAI), kas rodo didelį O/C santykį.

Paprastai humuso medžiagos, kurios rodo mažas C/N santykio vertes, pasižymi dideliu C/N santykiu (Schnitzer ir Khan, 1972). Iš dirvožemio nuolatiniam juodajame pūdyme (FAL) išskirtas huminas pasižymėjo didžiausiomis C/N vertėmis, o tai patvirtino didesnę jo aromatiškumą ir molekulių kondensaciją. Mažiausias C/N santykis buvo nustatytas humine (HUM) išskirtame iš dirvožemio taikant intensyvią sėjomainą (CRO), o tai atitinka aukštas O/C ir H/C santykių vertes, rodančias mažiau pažengusią transformacijos procesą, kuris gali būti susijęs su kasmetiniu šviežių organinių medžiagų patekimu į dirvožemį. Aukštas C/N santykis humine (HUM) išskirtame iš dirvožemio kukurūzų monopasėlyje su minerelinėmis NPK trąšomis (MAI-NPK) parodė didelę jo molekulių kondensaciją, kurią patvirtino žemas O/C santykis, tačiau to nepatvirtino H/C santykis.

Išanalizuota humino (HUM) elementinė sudėtis rodo, kad huminas (HUM), išskirtas iš dirvožemio nuolatiniam juodajame pūdyme (FAL), rugių monopasėlyje be trąšų (RYE), rugių monopasėlyje su minerelinėmis NPK trąšomis (RYE-NPK) ir kukurūzų monopasėlyje su minerelinėmis NPK trąšomis (MAI-NPK) yra labiau aromatinis. Tačiau iš dirvožemio izoliuotas huminas (HUM) paprastai pasižymi H/C santykiu 0,5–0,9, O/C santykiu 0,3–0,5 ir C/N santykiu 20–90 (Piccolo, 2001; Schnitzer ir Khan, 1972; Stevenson, 1994). Aptariami H/C ir O/C moliniai santykiai yra daug didesni nei žinomi iš mokslinės literatūros šaltinių, todėl išvados apie šių mėginių struktūros skirtumus, pagrįstos elementų sudėtimi, nėra vienareikšmės ir turi būti patvirtintos spektroskopinių tyrimų metu.

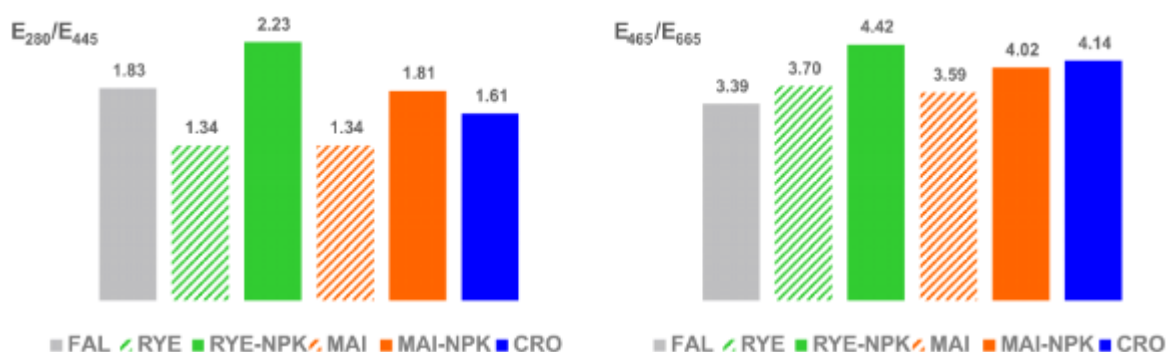
Gauti humino spektrai (3.26 pav.) pasižymi dvigubu specifiniu maksimumu, kurio intensyvumas yra didelis 250–280 nm diapazone, o tai atitinka ankstesnius humino (HUM) analizės tyrimus (Hewelke et al., 2024a; Mielnik et al., 2024). Mažiausią absorbciją šiame diapazone parodė huminas išskirtas iš dirvožemio rugių monopasėlyje be trąšų (RYE) ir taikant intensyvią sėjomainą (CRO). Šviesos absorbcija dirvožemio organinėje medžiagoje (SOM) didėja UV bangų diapazone kartu su aromatinių žiedų kondensacijos laipsniu anglies molekulės aromatinėje „šerdyje“ ir anglies alifatinėse grandinėse, taip pat didėjant ir molekulinei masei. Ilgesnių bangų diapazone spektrai yra monotoniški, tačiau su dviem charakteringomis savybėmis 445 nm ir 575 nm diapazone, kur huminas, išskirtas iš dirvožemio rugių monopasėlyje be trąšų (RYE) ir nuolatiniam juodajame pūdyme (FAL), parodė didžiausią absorbciją. Absorbcijos efektyvumas šiame bangos ilgyje yra susijęs daugiausia su chromoforo pakaitinėmis grupėmis aromatiname benzeno žiede arba alifatinėse grandinėse.



3.26 pav. Humino mėginių UV-Vis spektrai.

Pastaba: FAL – nuolatinis juodasis pūdimas, RYE – rugių monopasėlis be trąšų, RYE-NPK – rugių monopasėlis su minerelinėmis NPK trąšomis, MAI – kukurūzų monopasėlis be trąšų, MAI-NPK – kukurūzų monopasėlis su minerelinėmis NPK trąšomis, CRO – intensyvi sėjomaina.

Skirtumai koeficientuose, apskaičiuotuose UV-Vis spektrams, kurie dažniausiai naudojami huminių medžiagų struktūros skirtumams apibūdinti, pateikiami 3.27 pav. Santykinai mažesnės E465/E665 santykio vertės humine, išskirtame iš dirvožemio nuolatiniam juodajame pūdyme (FAL), rugių monokultūroje be trąšų (RYE) ir kukurūzų monokultūroje be trąšų (MAI) rodo santykinai didesnę aromatinių anglies junginių kondensavimo laipsnį, o tai leidžia daryti prielaidą, kad yra labai apdorotų dirvožemio organinės medžiagos (SOM) sandėjų (Stevenson, 1984; Chen et al., 1977). Šią tendenciją, išskyrus variantą, kur buvo taikyta intensyvi sėjomaina (CRO), patvirtino mažesnės E280/E445 santykio vertės humine, išskirtame iš dirvožemio nuolatiniam juodajame pūdyme (FAL) ir rugių monokultūroje be trąšų (RYE). Tai rodo pažangesnį humifikacijos procesą ir vidinę transformaciją link didesnio stabilumo (Helal et al., 2011).



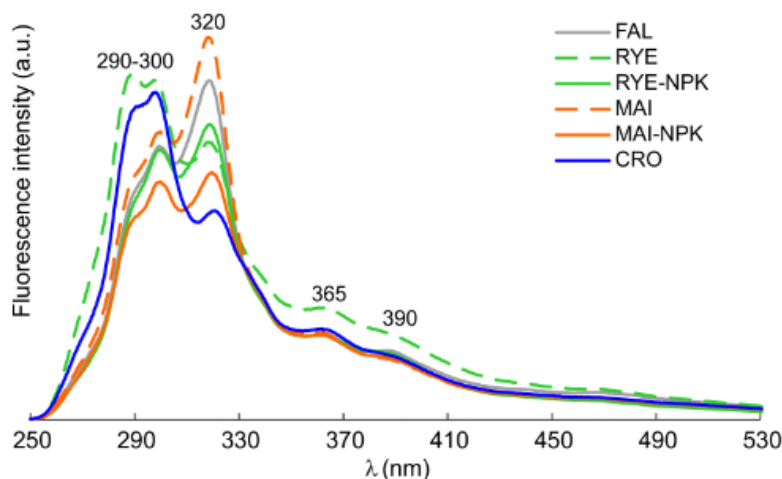
3.27 pav. Humino mėginių absorbcijos koeficientai.

Pastaba: FAL – nuolatinis juodasis pūdymas, RYE – rugių monokultūra be trąšų, RYE-NPK – rugių monokultūra su mineralinėmis NPK trąšomis, MAI – kukurūzų monokultūra be trąšų, MAI-NPK – kukurūzų monokultūra su mineralinėmis NPK trąšomis, CRO – intensyvi sėjomaina.

Didesnės E465/E665 santykio vertės humine, išskirtame iš dirvožemio rugių monokultūroje su mineralinėmis NPK trąšomis (RYE-NPK), kukurūzų monokultūroje su mineralinėmis NPK trąšomis (MAI-NPK) ir taikant intensyvią sėjomainą (CRO) rodo, kad yra palyginti didelis alifatinių junginių kiekis, kuris paprastai turi didesnę rūgštinių funkcinių grupių koncentraciją (Stevenson, 1984; Chen et al., 1977). Tai rodo, kad mineralinis tręšimas ir sėjomaina su ankštiniais augalais lėmė humino su maža aromatine polikondensacija susidarymą (Spaccini et al., 2000), susijusį su dideliu kiekiu jaunos medžiagos, kurios humifikacijos laipsnis yra mažesnis (Machado et al., 2020). Tai gali atspindėti molekulinės masės sumažėjimą, greičiausiai dėl didesnio oksidacijos greičio ir stimuliuoto mikrobu skilimo.

Tirti humino SSF spektrai parodė du ryškius pikus trumpųjų bangų diapazone: (a) dvigubą piką 290–300 nm bangos ilgio diapazone, labiausiai pastebimą humine, išskirtame iš dirvožemio rugių monokultūroje be trąšų (RYE) ir taikant intensyvią sėjomainą CRO ir (b) juostą 320 nm bangos ilgio diapazone, labiausiai išryškintą humine, išskirtame iš dirvožemio kukurūzų monokultūroje be trąšų (MAI) ir nuolatiniam juodajame pūdyme (FAL) (3.28 pav.). Fluorescenciniai spektrai taip pat parodė silpnas viršūnes ilgesniuose bangos ilgiuose (365 ir 390 nm), o didžiausias intensyvumas buvo pastebėtas humine, išskirtame iš dirvožemio rugių monokultūroje be trąšų (RYE).

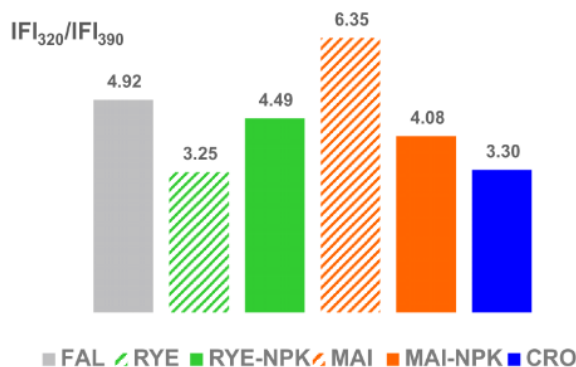
Paprastai maksimumai, pasiekiami esant mažesniems bangos ilgiams, rodo komponentų, būdingų struktūroms su mažesniu aromatiškumu ir heteropolikondensacija, buvimą. Sinchroniniuose spektruose esanti 280 nm fluorescencijos juosta priskiriama baltymų struktūroms, pirmiausia triptofano likučiams, o tai rodo, kad humine, išskirtame iš dirvožemio rugių monokultūroje be trąšų (RYE) ir taikant intensyvią sėjomainą (CRO) yra didesnė šių struktūrų dalis. Tačiau didesnis fluorescencijos intensyvumas humine (išskirtame iš dirvožemio rugių monokultūroje be trąšų (RYE)) ilgo bangos ilgio srityje, gali rodyti didesnę didelės molekulinės masės komponentų kiekį.



3.28 pav. Humino mėginių sinchroninio skenavimo fluorescencijos (SSF) spektrai.

Pastaba: FAL – nuolatinis juodasis pūdymas, RYE – rugių monopsėlis be trąšų, RYE-NPK – rugių monopsėlis su mineralinėmis NPK trąšomis, MAI – kukurūzų monopsėlis be trąšų, MAI-NPK – kukurūzų monopsėlis su mineralinėmis NPK trąšomis, CRO – intensyvi sėjomaina.

Aukštos IF_{320}/IF_{390} koeficiento vertės, apskaičiuotos pagal SSF spektrus (3.29 pav.), rodo baltymų medžiagos santykį su sunkiau skaidoma medžiaga (Lu et al., 2003). Didesnis humino, išskirto iš dirvožemio rugių monopsėlyje be trąšų (RYE), stabilumas buvo patvirtintas mažesnėmis šio koeficiento vertėmis, o didesnė jo vertė humine, išskirtame iš dirvožemio taikant intensyvią sėjomainą (CRO), gali būti susijusi su vien tik ankštinių augalų auginimu arba ankštinių augalų mišiniu, papildytu mėšlu (Mendoca et al., 2004). EEM spektrai parodė keturias charakteringas juostas ex/em bangų ilgių diapazonuose (3.12 lentelė ir 3.30 pav.).



3.29 pav. Humino mėginių SSF fluorescencinis koeficientas.

Pastaba: FAL – nuolatinis juodasis pūdymas, RYE – rugių monopsėlis be trąšų, RYE-NPK – rugių monopsėlis su mineralinėmis NPK trąšomis, MAI – kukurūzų monopsėlis be trąšų, MAI-NPK – kukurūzų monopsėlis su mineralinėmis NPK trąšomis, CRO – intensyvi sėjomaina.

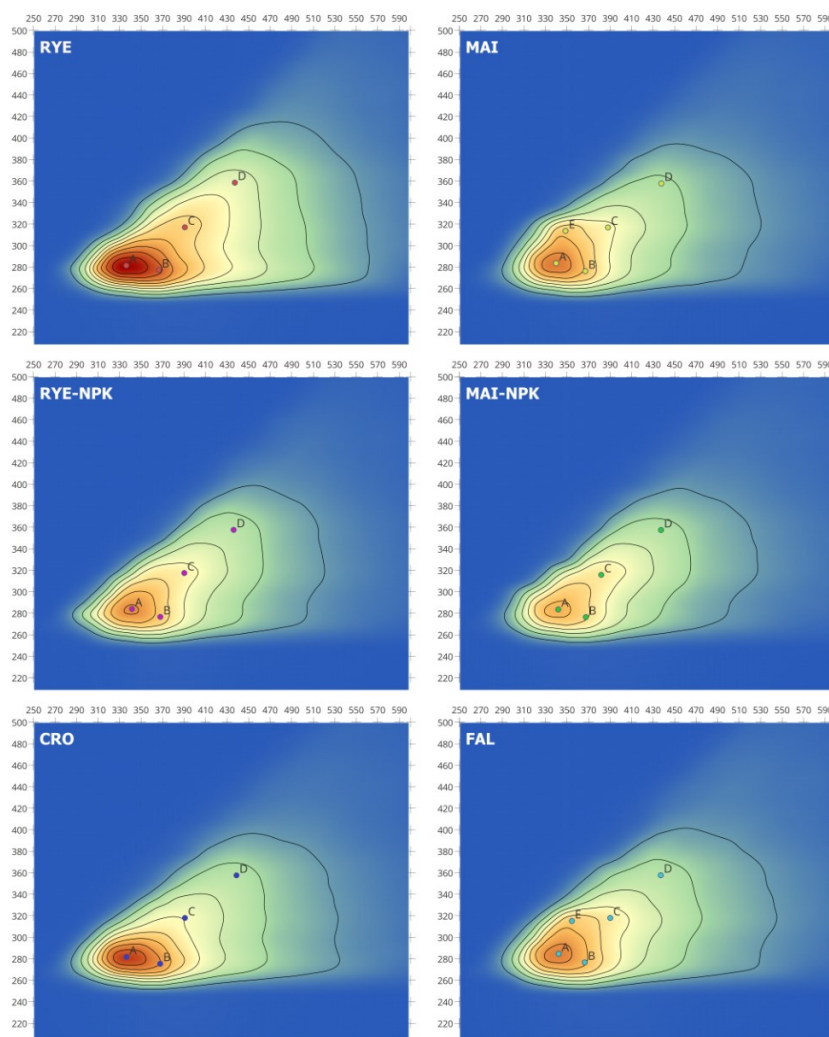
3.12 lentelė. Maksimumų vieta EEM spektruose ir humino mėginių fluorescencijos intensyvumas.

	A		B		C		D	
	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$	IFI	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$	IFI	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$	IFI	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$	IFI
FAL	286/342	74	278/366	61	319/390	46	359/437	24
RYE	282/336	99	278/367	82	318/391	54	359/437	35
RYE NPK	285/342	71	278/368	56	318/390	44	359/436	25
MAI	284/340	76	277/367	59	318/388	42	359/438	22
MAI NPK	285/342	63	277/367	51	317/382	47	358/437	24
CRO	283/336	87	276/368	69	319/391	39	359/439	23

Pastaba: FAL – nuolatinis juodasis pūdymas, RYE – rugių monopsėlis be trąšų, RYE-NPK – rugių monopsėlis su mineralinėmis NPK trąšomis, MAI – kukurūzų monopsėlis be trąšų, MAI-NPK – kukurūzų monopsėlis su mineralinėmis NPK trąšomis, CRO – intensyvi sėjomaina.

Didžiausią fluorescencijos intensyvumą parodė huminas, išskirtas iš dirvožemio rugių monopasėlyje be trąšų (RYE) ir taikant intensyvią sėjomainą (CRO), o ypač – trumpųjų bangų spektro dalyje. Žinoma, šie skirtumai yra susiję su įvairiomis agroekosistemomis, dėl kurių skiriasi anglies įnašai (pvz., pasėlių liekanos, šaknų išskyros) ir anglies nuostoliai dėl dirvožemio sutrikdymo ir organinių medžiagų skilimo (Zhang et al., 2024).

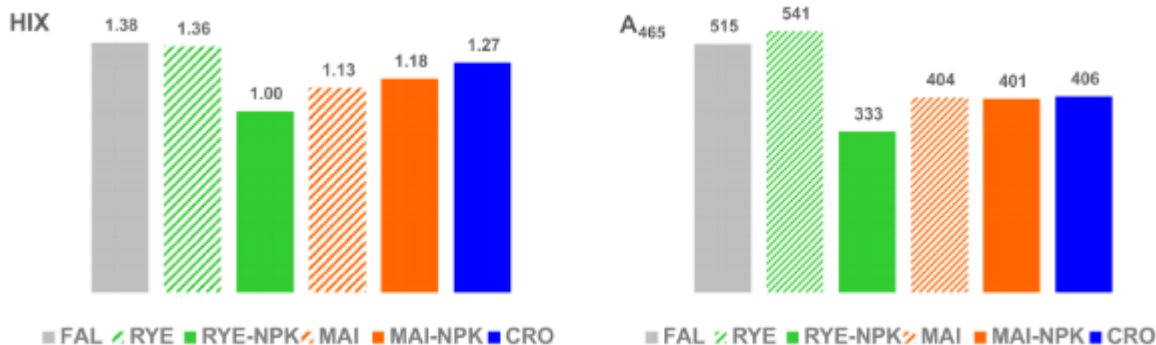
A ir B pikai yra labai intensyvūs ir atspindi paprastų struktūrinių komponentų, turinčių mažą molekulinę masę, fluorescenciją. Tai greičiausiai yra susiję su amino rūgščių darinių, laisvų arba įtrauktų į baltymų struktūras, buvimu (Sierra et al., 2005; Santin et al., 2009), o pikas A gali būti priskirtas tirpioms medžiagoms, panašioms į mikroorganizmų šalutinius produktus. Savo ruožtu, pikas B taip pat priskiriamas aminorūgščių darinių ir heterociklinių N junginių struktūroms. Pikas C atspindi fluorochromus, susijusius su silpnai transformuota humine medžiaga ir didele šviežios medžiagos dalimi. Nors D pikas yra labai silpnas, jis gali būti priskirtas didelės molekulinės masės komponentams, turintiems linijinius kondensuotus aromatinius žiedus, o tai rodo, kad stabilų formų organinėse medžiagose yra surišų likučių (Plaza et al., 2006; Santos et al., 2020).



3.30 pav. Humino mėginių EEM spektrai

Pastaba: FAL – nuolatinis juodasis pūdymas, RYE – rugių monopasėlis be trąšų, RYE-NPK – rugių monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis, MAI – kukurūzų monopasėlis be trąšų, MAI-NPK – kukurūzų monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis, CRO – intensyvi sėjomaina.

Daugiau informacijos gali suteikti koeficientai, apskaičiuoti pagal EEM spektrus (3.31 pav.).

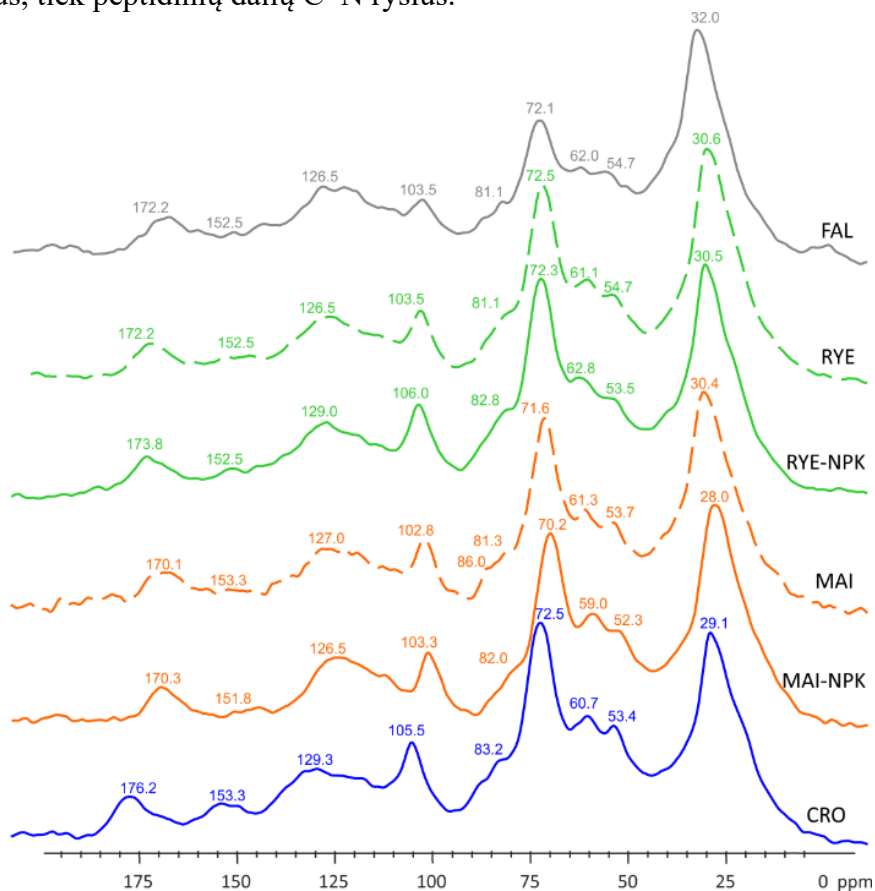


3.31 pav. Humino mėginių EEM fluorescenciniai koeficientai.

Pastaba: FAL – nuolatinis juodasis pūdymas, RYE – rugių monopsėlis be trąšų, RYE-NPK – rugių monopsėlis su minerelinėmis NPK trąšomis, MAI – kukurūzų monopsėlis be trąšų, MAI-NPK – kukurūzų monopsėlis su minerelinėmis NPK trąšomis, CRO – intensyvi sėjomaina.

Aukštos HIX ir A₄₆₅ koeficientų vertės yra būdingos didelės molekulinės masės frakcijai ir paprastai rodo didesnę aromatiškumą struktūroje. Aukštesnės šių koeficientų vertės RYE ir FAL humine patvirtino labiau aromatinę struktūrą ir (arba) didesnę nesočiųjų alifatinių grandžių susiejimo laipsnį, palyginti su kitomis. Žemesnės HIX vertės yra būdingos SOM, kuris yra labiau jautrus mikrobiologiniam skilimui.

Humino mėginių ¹³C CPMAS NMR spektrai pasižymi ryškiais rezonais 30/31 ppm diapazone (3.32 pav.) ir kyla iš alifatinės grandinės metileno segmentų, priklausančių įvairiems lipidų junginiams, pvz., riebalų rūgštims, vaškam ir biopolimerams bei perdirbtiems šalutiniams produktams. Vėlesnis intervalas, apibrėžtas pikų, kurių centras yra apie 54 ppm diapazone, gali apimti tiek lignino fragmentų guaiacilo ir siringilo vienetų aromatinių žiedų metoksilinius pakaitus, tiek peptidinių dalių C–N ryšius.



3.32 pav. Humino mėginių ¹³C-CPMAS NMR spektrai.

Pastaba: FAL – nuolatinis juodasis pūdymas, RYE – rugių monopsėlis be trąšų, RYE-NPK – rugių monopsėlis su minerelinėmis NPK trąšomis, MAI – kukurūzų monopsėlis be trąšų, MAI-NPK – kukurūzų monopsėlis su minerelinėmis NPK trąšomis, CRO – intensyvi sėjomaina.

Aiškūs pikai, esantys 60–110 ppm diapazono cheminio poslinkio srityje, yra neapsaugotos O-alkil-C funkcijos piranozės ir furanosės komponentai, daugiausia kilę iš polisacharidų grandinių, tokių kaip celiuliozė ir hemiceliuliozė augalų audiniuose. Pirmasis signalas 64 ppm diapazone yra iš plokštumos išsikišęs C6, po kurio seka intensyvus susilieėjimas 72 ppm diapazone, sudarytas iš anglies 2, 3 ir 5 spektrinių sluoksnių, esančių piranozido struktūroje (3.32 pav.). Mažiau pastebimos juostos, matomos 81–86 ppm diapazone, yra kilusios iš anglies 4, dalyvaujančios glikozidiniame ryšyje su di-O-alkil anomerine anglimi 1 103 ppm diapazone.

Platus rezonansas, apimantis arilo-C sritį (110–140 ppm), apima nepakeistą ir C pakeistą fenilo anglį lignino monomeruose, taip pat kondensuotas aromatinės grupės, o greta esančios fenolio aromatinės grupės (140–160 ppm) rodo O pakeistų žiedo anglies atomų buvimą (lignino ir polifenolio junginiuose). Galiausiai, plačia juosta 174 ppm diapazone rodo karbonilo grupių buvimą natūraliuose junginiuose, pvz., alifatinėse rūgštyse, peptidinėse dalyse, pektino darinių šoninėse grupėse arba oksiduotuose šalutiniuose produktuose.

Organinės anglies pasiskirstymas parodė atitinkamą ir bendrą alkilų (0–45 ppm) ir aromatinių frakcijų (110–160 ppm) įtraukimą, sudarantį 49–56 % bendro ploto, apibendrinant tendencingai aukštas hidrofobinio indekso ir alkilų santykio vertes (3.13 lentelė). Selektyvus nepoliarinių sudedamųjų dalių išsaugojimas yra būdinga dirvožemio humino savybė, kurios susidarymą gali skatinti laipsniškas mažiau skaidomų, atsparių organinių medžiagų kaupimasis, kurį papildytų dirvožemio mineralai (Gamage et al., 2024; Weber et al., 2024; Zhang et al., 2019).

NMR analizės duomenys pabrėžia humino sudėties skirtumus priklausomai nuo dirvožemio kokybės valdymo būdo. Nuolatinio juodojo pūdymo sistema skatino didesnę hidrofobinių dalių išsaugojimą, kurį rodo didelės A/OA ir HB molekulinės parametrų vertės (3.13 lentelė). Taigi, galima daryti išvadą, kad organinių medžiagų įnašo iš pasėlių ar dirvožemio pagerinimo priemonių trūkumas lemia bendrosios organinės anglies (TOC) kiekio sumažėjimą (3.10 lentelė) ir selektyvų stabilų nepoliarinių organinių medžiagų išlikimą humine (Sun et al., 2022; Wang et al., 2023).

3.13 lentelė. C pasiskirstymas (%) pagal cheminio poslinkio sritis (ppm) CPMAS NMR spektruose ir susiję humino mėginių struktūriniai indeksai.

	C=O 190-160	O-aryl-C 160-140	aryl-C 140-110	O-alkyl-C 110-60	CH ₃ O/C-N 60-45	alkyl-C 45-0	A/OA	HB	LR	Al/Ar
FAL	5.3	4.6	15.3	28.8	9.7	36.4	1.3	1.6	2.1	3.0
RYE	4.7	3.5	13.5	33.2	9.1	36.0	1.1	1.4	2.6	3.2
RYE-NPK	5.3	2.8	15.1	36.6	8.7	31.4	0.9	1.2	3.1	3.3
MAI	6.0	2.6	14.0	31.7	9.9	35.7	1.1	1.3	3.8	3.4
MAI-NPK	4.4	2.6	14.0	34.3	8.5	36.1	1.1	1.3	3.2	3.8
CRO	4.6	3.0	14.3	38.6	11.8	27.6	0.7	1.0	3.9	3.6

Indekso apskaičiavimo metodas: A/OA=(0-45)/(60-110); HB=S[(0-45)+(45-60/2)+(110-160)]/S[(45-60)/2+(60-110)+(160-190)]; LR = (45-60)/(140-160); Al/Ar=(0-110)/(110-190).

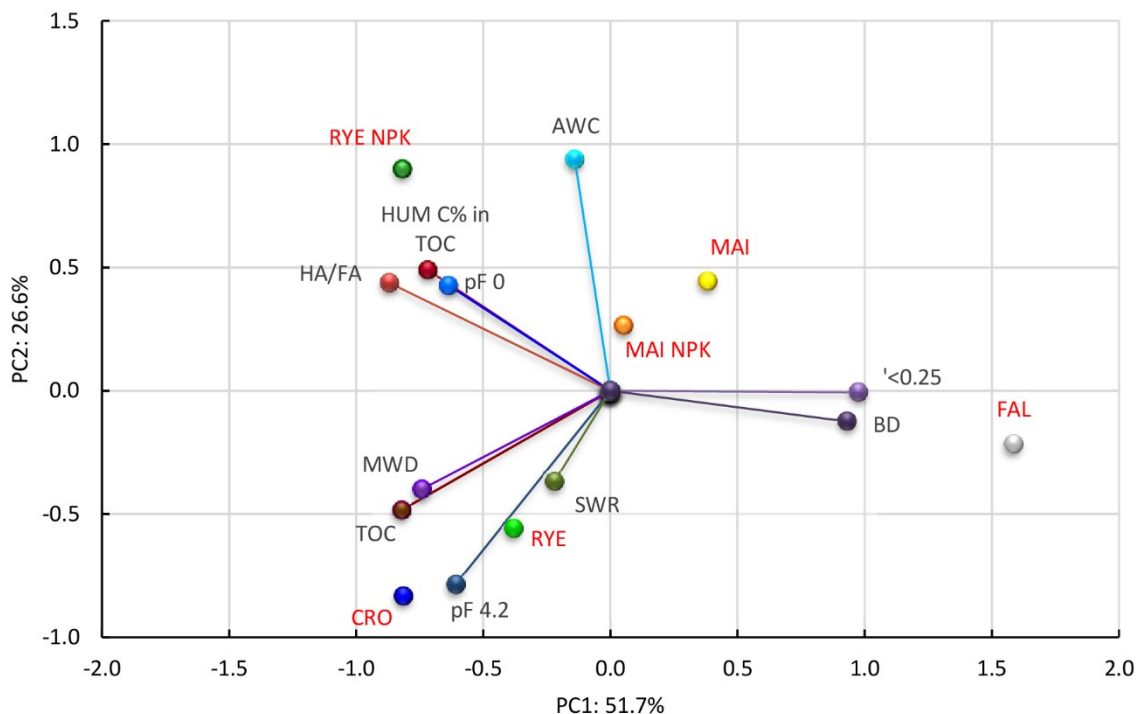
Pastaba: FAL – nuolatinis juodasis pūdymas, RYE – rugių monopasėlis be trąšų, RYE-NPK – rugių monopasėlis su minerelinėmis NPK trąšomis, MAI – kukurūzų monopasėlis be trąšų, MAI-NPK – kukurūzų monopasėlis su minerelinėmis NPK trąšomis, CRO – intensyvi sėjomaina.

Priešingai, humino frakcija, išskirta iš dirvožemio eksperimento variantuose su egzogeninėmis organinėmis medžiagomis, taikant intensyvią sėjomainą (CRO), parodė didelę hidrofobinių O-alkil-C ir C-N junginių integraciją, kurią pabrėžė nuoseklus alkilų santykio (A/OA) ir hidrofobinio indekso (HB) parametrų sumažėjimas kartu su lignino santykio (LR lygis) padidėjimu. Dirvožemio humino sancaupos, gautos rugių ir kukurūzų monopasėliuose, su trąšų priedais arba be jų, parodė tarpinę molekulinę charakteristiką tarp dviejų kontrastingų dirvožemio kokybės valdymo būdų (3.13 lentelė). Santykinis konkrečių klasių kiekis ir apskaičiuoti indeksai

parodė paveldėtų atsparių frakcijų ir įterptų organinių junginių, gautų dėl skirtingų auginimo sąlygų (pavyzdžiui, organinės liekanos, eksudatai, mikrobiologinė biomasė ir kt.), derinį. Galima teigti, kad atsparūs humino telkiniai gali veikti kaip dirvožemio organinės medžiagos (SOM) dinamikos sekimo elementas ilgalaikio dirvožemio kokybės valdymo metu.

Alifatinis santykis (Al/Ar) apibūdina alifatinių ir aromatinių komponentų proporciją. Mažesnės šio koeficiento vertės humine, išskirtame iš dirvožemio nuolatiname juodajame pūdyme (FAL) ir rugių monopasėlyje be trąšų (RYE) indikavo didesnę aromatinių struktūrų dalį šiuose variantuose, patvirtindamos elementinės sudėties, UV-Vis ir fluorescencijos rezultatus.

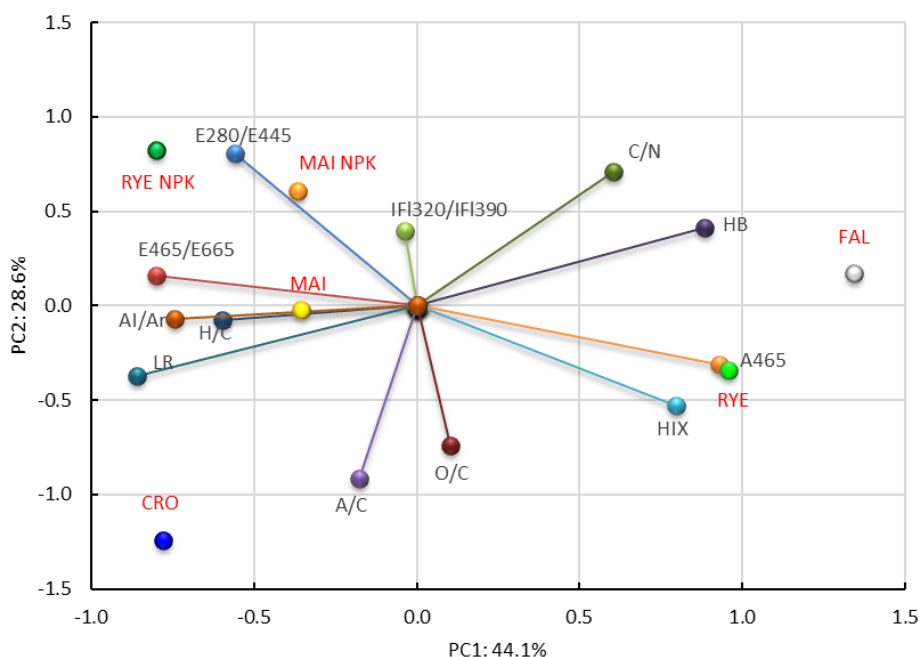
3.33 paveiksle pateikti pagrindinių komponentų analizės (PCA) rezultatai, susiję su dirvožemio savybėmis, rodo, kad pirmasis pagrindinis komponentas (PC1) paaiškina 51,7 % visų analizuotų kintamųjų bendro kintamumo. Antrasis pagrindinis komponentas (PC2) paaiškina 26,6% kintamumo. Abu pagrindiniai komponentai paaiškina daugiau nei 78 % bendro kintamumo. Labiausiai išsiskiriantys eksperimento variantai buvo nuolatinis juodasis pūdymas (FAL), intensyvi sėjomaina (CRO) ir rugių monopasėlis su minerelinėmis NPK trąšomis (RYE-NPK). Nuolatinis juodasis pūdymas (FAL) pasižymėjo didžiausiomis dirvožemio tankio vertėmis ir <0,25 mm mikroagregatais. Intensyvi sėjomaina (CRO) pasižymėjo didžiausiomis bendrosios organinės anglies (TOC), dirvožemio agregatų vidutiniu diameteru (MWD) ir pF=4,2 vertėmis. Du eksperimento variantai – kukurūzų monopasėlis be trąšų (MAI) ir kukurūzų monopasėlis su minerelinėmis NPK trąšomis (MAI-NPK) – buvo labai panašūs pagal daugumą kintamųjų, kurių vertės buvo vidutinės. Rugių monopasėlio be trąšų (RYE) variantas pasižymėjo dideliu potencialiuoju hidrofobiškumu (SWR) ir pF=4,2. Aukščiausios humino (HUM) anglies procentas bendrojoje organinėje anglyje (TOC), HA/FA frakcijų santykis, pF=0 ir AWC vertės buvo nustatytos rugių monopasėlio su minerelinėmis NPK trąšomis (RYE-NPK) dirvožemyje. Dirvožemio tankis (BD) ir <0,25 mikroagregatai buvo stipriai teigiamai koreliuoti ir neigiamai koreliuoti su dauguma kitų dirvožemio savybių, ypač su bendrąja dirvožemio anglimi (TOC), dirvožemio agregatų vidutiniu diameteru (MWD), HA/FA frakcijų santykiu, humino (HUM) anglies procentiniu kiekiu bendrojoje organinėje anglyje ir pF=0.



3.33 pav. Biplot, pagrįstas PCA rezultatais, pateikiantis daugiamačius skirtumus tarp eksperimento variantų ir ryšius tarp kintamųjų, kuriuos charakterizuoja dirvožemio savybės.

Pastaba: FAL – nuolatinis juodasis pūdymas, RYE – rugių monopasėlis be trąšų, RYE-NPK – rugių monopasėlis su minerelinėmis NPK trąšomis, MAI – kukurūzų monopasėlis be trąšų, MAI-NPK – kukurūzų monopasėlis su minerelinėmis NPK trąšomis, CRO – intensyvi sėjomaina.

Humino (HUM) pagrindinių komponentų charakteristikų analizė (PCA) pateikta 3.34 pav. PCA rezultatai rodo, kad pirmasis (PC1) ir antrasis (PC2) pagrindiniai komponentai paaiškina daugiau nei 72 % visos duomenų rinkinio kintamumo. Intensyvi sėjomaina (CRO) ir rugių monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis (RYE-NPK) buvo panašūs variantai pagal daugumą tiriamų humino savybių. Šie du variantai pasižymėjo aukštu LR, H/C, AI/Ar ir E465/E665. Visai priešingi buvo nuolatinio juodojo pūdymo (FAL) ir rugių monopasėlio be trąšų (RYE) variantai, kurie pasižymėjo žemomis šių kintamųjų vertėmis ir aukštomis HB ir A465 vertėmis. Kukurūzų monopasėlio be trąšų (MAI) ir kukurūzų monopasėlio su mineralinėmis NPK trąšomis (MAI-NPK) variantai pasižymėjo vidutinėmis daugumos humino savybių vertėmis – LR, H/C, AI/Ar, E280/E445 ir E465/E665 buvo stipriai teigiamai koreliuoti. Stipri teigiama koreliacija buvo nustatyta tarp C/N, HB, A465 ir HIX. Šie du kintamųjų rinkiniai buvo neigiamai koreliuoti tarpusavyje. IFI320/IFI390, A/C ir O/C buvo kintamieji, kurie buvo silpnai koreliuoti su visomis kitomis humino savybėmis.



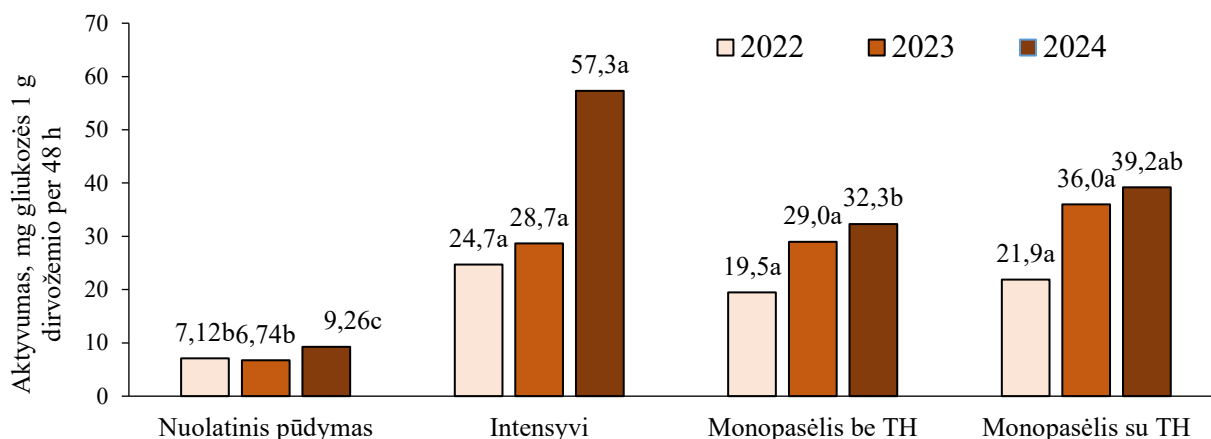
3.34 pav. Biplot, pagrįstas PCA rezultatais, pateikiantis daugiamačius skirtumus tarp eksperimentinių apdorojimų ir ryšius tarp kintamųjų, kuriuos apibūdina humino savybės.

Pastaba: FAL – nuolatinis juodasis pūdyimas, RYE – rugių monopasėlis be trąšų, RYE-NPK – rugių monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis, MAI – kukurūzų monopasėlis be trąšų, MAI-NPK – kukurūzų monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis, CRO – intensyvi sėjomaina.

3.2.4. Dirvožemio fermentų aktyvumas

Fermento sacharazės aktyvumas žieminių rugių agroceozėje. Žieminių rugių agroceozėje kasmet įnešant į dirvožemį organinės medžiagos ir taikant agrotechnines priemones (tręšimą mineralinėmis trąšomis ir purškimą herbicidais) dirvožemio fermento sacharazės aktyvumas 2022 m. nustatytas esmingai nuo 2,7 iki 3,5 karto, 2023 m. – nuo 4,3 iki 5,3 karto, 2024 m. – nuo 3,5 iki 6,2 karto didesnis negu juodojo pūdymo dirvožemyje (3.35 pav.).

Didesnis organinės medžiagos įnašas į dirvožemį (tarpiniai pasėliai, mėšlas, daugiametės žolės) intensyvioje sėjomainoje 2022 m. lėmė didžiausią fermento sacharazės aktyvumą žieminių rugių agroceozėje, tačiau, palyginti su monopasėliais, esminių skirtumų nenustatyta. Rugių monopasėlio tręšimas mineralinėmis trąšomis ir purškimas herbicidais negarantavo esmingai didesnio fermento sacharazės aktyvumo dirvožemyje, palyginti su netręštu ir herbicidais nepurkštu monopasėliu.

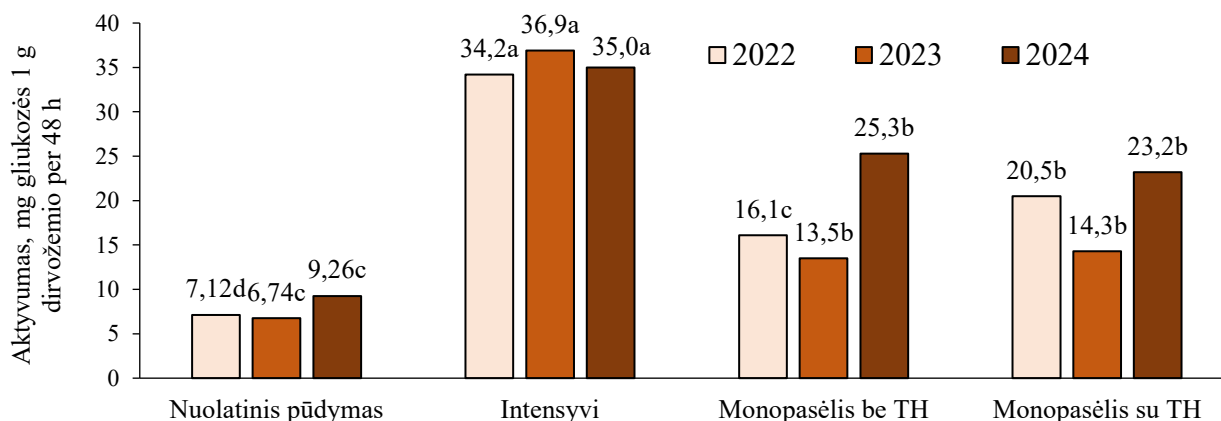


3.35 pav. Fermento sacharazės aktyvumas žieminių rugių agrocezojė 2022, 2023, 2024 m.

Pastaba: Tarp reikšmių stulpeliuose, pažymėtų ne tomis pačiomis raidėmis, yra esminiai skirtumai ($P < 0,05$). T – trąšos, H – herbicidai.

2024 m. žieminius rugius auginant intensyvioje sėjomainoje fermento ureazės aktyvumas nustatytas esmingai 77,4 % didesnis negu monopasėlyje be trąšų ir herbicidų. L. Wang ir kt. (2021) nustatė, kad tręšimas organinėmis trąšomis dirvožemio fermentų aktyvumui darė didesnę įtaką negu tręšimas mineralinėmis trąšomis ir purškimas herbicidais.

Fermento sacharazės aktyvumas kukurūzų pasėlyje. Kukurūzus auginant monopasėlyje bei intensyvioje sėjomainoje po pavasarį žaliajai trąšai įterptų žieminių rugių fermento sacharazės aktyvumas 2022 m. nustatytas esmingai nuo 2,3 iki 4,8 karto, 2023 m. – nuo 2,0 iki 5,5 karto, 2024 m. – nuo 2,5 iki 3,8 karto didesnis negu juodojo pūdymo dirvožemyje (3.36 pav.).

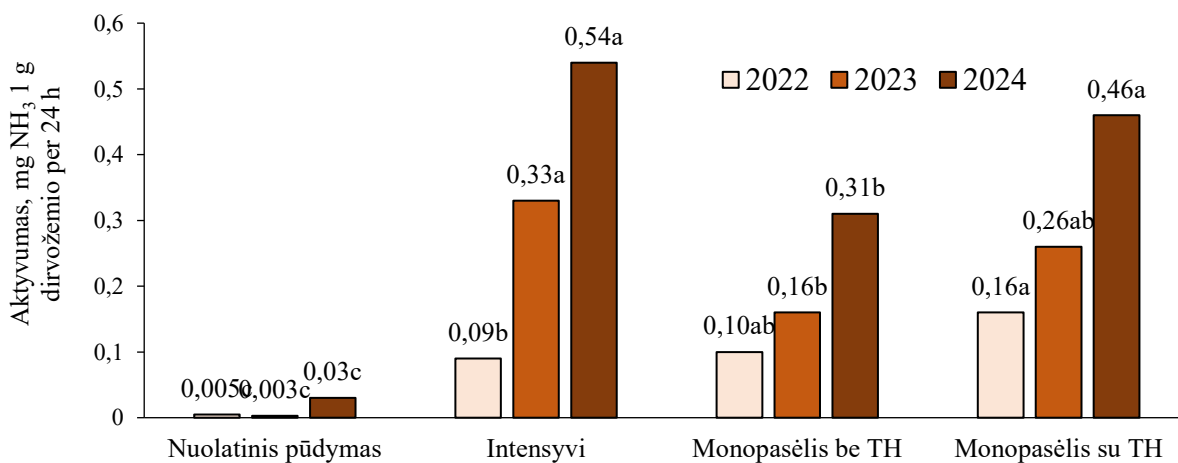


3.36 pav. Fermento sacharazės aktyvumas kukurūzų agrocezojė 2022, 2023, 2024 m.

Pastaba: Tarp reikšmių stulpeliuose, pažymėtų ne tomis pačiomis raidėmis, yra esminiai skirtumai ($P < 0,05$). T – trąšos, H – herbicidai.

Kukurūzus auginant intensyvioje sėjomainoje fermento sacharazės aktyvumas dirvožemyje 2022 m. nustatytas esmingai 1,7 ir 2,1 karto, 2023 m. – 2,6 ir 2,7, 2024 m. – 1,5 ir 1,4 karto didesnis negu monopasėliuose. D. Chavarría ir kt. (2016), nurodo, kad tarpiniai pasėliai didina dirvožemio fermentų aktyvumą vidutiniškai 20 %. 2022 m. kukurūzų monopasėlio tręšimas mineralinėmis trąšomis ir purškimas herbicidais esmingai 27,3 % didina fermento sacharazės aktyvumą dirvožemyje, palyginti su netręštu ir herbicidais nepurkštu monopasėliu, o 2023 ir 2024 m. esminės įtakos neturėjo.

Fermento ureazės aktyvumas žieminių rugių agroceozėje. Juodojo pūdymo dirvožemyje fermento ureazės aktyvumo nustatyti tik pėdsakai (3.37 pav.). Žieminius rugius auginant monopasėlyje bei intensyvioje sėjomainoje po daugiamečių žolių fermento ureazės aktyvumas 2022 m. nustatytas esmingai nuo 18 iki 32 karto, 2023 m. – nuo 53 iki 110 karto, 2024 m. – nuo 10 iki 18 karto didesnis negu juodojo pūdymo dirvožemyje.

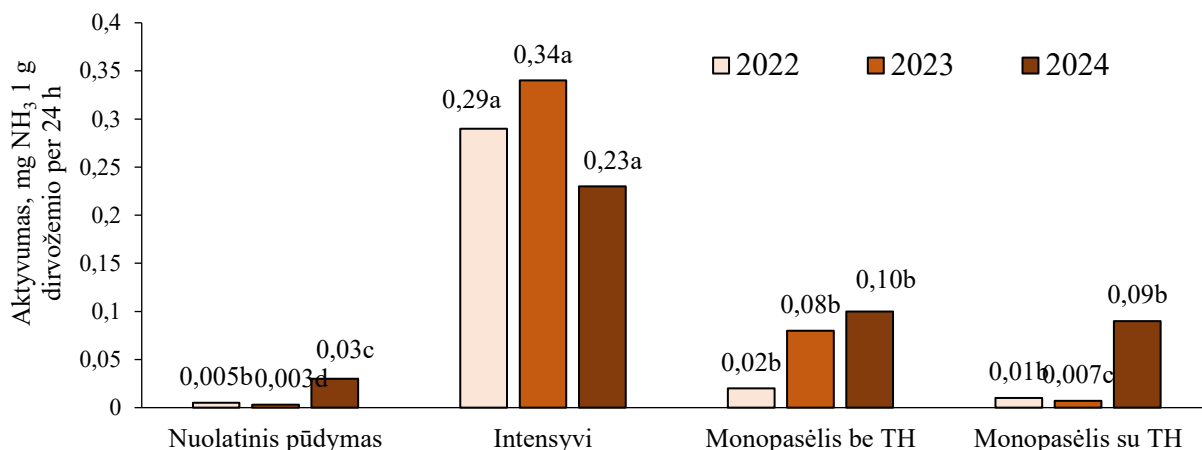


3.37 pav. Fermento ureazės aktyvumas žieminių rugių agroceozėje 2022, 2023, 2024 m.

Pastaba: Tarp reikšmių stulpeliuose, pažymėtų ne tomis pačiomis raidėmis, yra esminiai skirtumai ($P < 0,05$). T – trąšos, H – herbicidai.

2022 m. didesnis organinės medžiagos įnašas į dirvožemį intensyvioje sėjomainoje lėmė fermento ureazės aktyvumo mažėjimą žieminių rugių agroceozėje, palyginti su monopasėliais. Matomai, susiformavus didesniai rugių grūdų derlingumui, iš dirvožemio buvo įsavitinta daugiau azoto, nuo kurio priklausė šio fermento aktyvumas. Rugių monopasėlio tręšimas mineralinėmis trąšomis ir purškimas herbicidais esmingai 1,8 karto didino fermento ureazės aktyvumą dirvožemyje, palyginti su intensyvia sėjomaina. 2023 didesnis organinės medžiagos įnašas į dirvožemį intensyvioje sėjomainoje lėmė fermento ureazės aktyvumo esminį 2,1 karto padidėjimą žieminių rugių agroceozėje, palyginti su netręštu ir nepurkštu rugių monopasėliu. Rugių monopasėlio tręšimas mineralinėmis trąšomis ir purškimas herbicidais didino fermento ureazės aktyvumą dirvožemyje, palyginti su nepurkštu ir netręštu rugių monopasėliu, tačiau neesmingai. 2024 m. rugius auginant intensyvioje sėjomainoje ir monopasėlyje su trąšomis ir herbicidais, dirvožemio fermento ureazės aktyvumas nustatytas esmingai 1,5 ir 1,7 karto didesnis negu monopasėlyje be trąšų ir herbicidų. L. M. Rankoth ir kt. (2019) duomenimis, tarpiniai pasėliai darė nevienodą įtaką dirvožemio fermentų aktyvumui: vienų fermentų aktyvumą didino, kitų mažino, palyginti su laukeliais be tarpinio pasėlio. E. Erdel ir U. Şimşek (2023) teigia, kad sėjomainoje auginami tarpiniai pasėliai daro didesnę įtaką dirvožemio fermentų aktyvumui negu žemės dirbimas. H. Feng ir kt. (2020) nurodo, kad sėjomainos taikymas didino dirvožemio fermento ureazės aktyvumą, palyginti su monopasėliu.

Fermento ureazės aktyvumas kukurūzų agroceozėje. Kukurūzus auginant monopasėlyje bei intensyvioje sėjomainoje po daugiamečių žolių fermento ureazės aktyvumas 2022 m. nustatytas esmingai nuo 2 iki 58 karto, 2023 m. – nuo 2,3 iki 113 karto, 2024 m. – nuo 3 iki 7,7 karto didesnis negu juodojo pūdymo dirvožemyje (3.38 pav.).



3.38 pav. Fermento ureazės aktyvumas kukurūzų agroceozėje 2022, 2023, 2024 m.

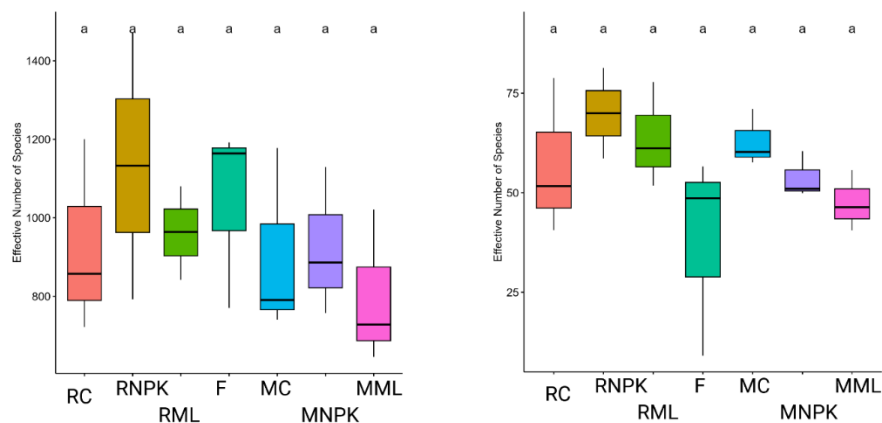
Pastaba: Tarp reikšmių stulpeliuose, pažymėtų ne tomis pačiomis raidėmis, yra esminiai skirtumai ($P < 0,05$). T – trąšos, H – herbicidai.

Kukurūzus auginant intensyvioje sėjomainoje fermento ureazės aktyvumas dirvožemyje 2022 m. nustatytas esmingai 10 ir 29 karto, 2023 m. – 4,3 ir 48,6 karto, 2024 m. – 2,3 ir 2,6 karto didesnis negu monopasėliuose. 2023 m. kukurūzų monopasėlio tręšimas mineralinėmis trąšomis ir purškimas esmingai 11,4 karto mažino fermento ureazės aktyvumą dirvožemyje, palyginti su netręštu ir herbicidais nepurkštu monopasėliu. K. Kondratowicz-Maciejewska ir kt. (2025) duomenimis, tręšimas tik mineralinėmis trąšomis esmingai mažino dirvožemio fermentų aktyvumą, palyginti su tręšimu organinėmis ir mineralinėmis trąšomis. M. Kobierski ir kt. (2020) nustatė, kad sėjomainoje auginant pupinių šeimos augalus ir tręšiant mėšlu dirvožemio fermentų aktyvumas nustatytas esmingai didesnis, palyginti su sėjomaina, kurioje buvo tręšiama tik organinėmis trąšomis. Didžiausias fermentų aktyvumas buvo mėšlu tręstame dirvožemyje. Azoto trąšų poveikis fermentų aktyvumui skyrėsi priklausomai nuo kiekvieno fermento specifikos (Lemanowicz et al., 2024). D. N. Borase ir kt. (2020) duomenimis, pupinių šeimos augalų įtraukimas į sėjomainą ir organinių trąšų naudojimas (mėšlo, augalų likučių) daro ilgalaikį tvarų poveikį dirvožemio fermentų aktyvumui. N. Z. Lupwayi ir kt. (2024) nustatė, kad pupinių šeimos augalų įtraukimas į sėjomainą, palygint su aliejiniais augalais, dirvožemio fermentų aktyvumą padidino nuo 33 iki 57 %. L. Zhang ir kt. (2025) duomenimis, sėjomainos taikymas, palyginti su monopasėliu, padidino dirvožemio fermentų aktyvumą nuo 2,83 iki 12,9 %.

3.2.5. Dirvožemio mikrobiotos pokyčiai

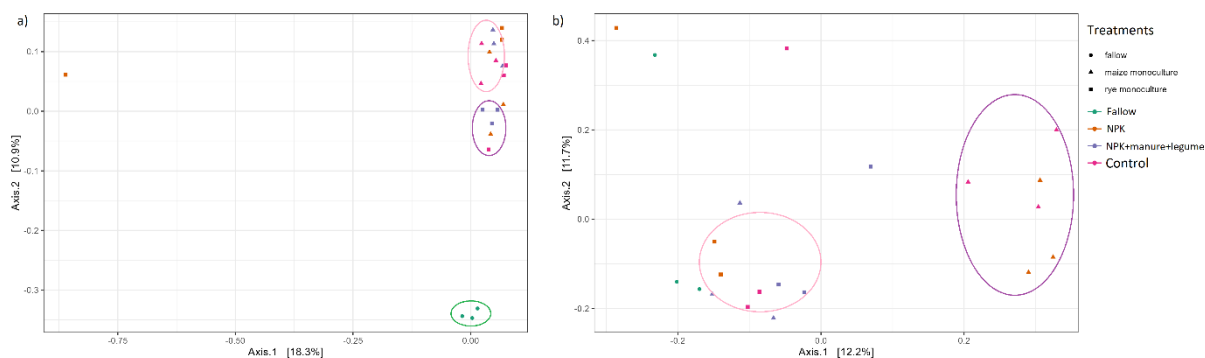
Dirvožemio mikrobiomo bendrijų struktūra buvo analizuojama naudojant didelio našumo sekvenavimą. Bakterijų bendrijų 16S rRNA geno V3-V4 regionas ir grybų vidinis transkribuojamas spaceris 1 (ITS) regionas buvo amplifikuoti ir sekvenuoti. Mes įvertinome veiksmingą rūšių skaičių (ENS) kaip rūšių įvairovės matą. Rezultatai pateikiami 3.39 paveiksle. Gauti duomenys parodė mikrobiologinę įvairovę tiriamuose variantuose.

Pateikti bakterijų ir grybų alfa įvairovės duomenys parodė, kad bakterijų bendruomenėje buvo pastebėtas didesnis įvairovės diapazonas. Tačiau abiejose grupėse buvo pastebėtos panašios įvairovės tendencijos. Rugių monopasėlių variantas pasižymėjo didesne įvairove nei kukurūzų monopasėlių. Be to, analizė parodė, kad grybų įvairovė sumažėjo pūdymuose. Apskritai, metagenominis įvairovės indeksas buvo labiau įvairus bakterijų bendrijų duomenyse. Papildomas tyrimas dėl galimų bakterijų ir grybų bendrijų struktūros ryšių tiriamuose eksperimento variantuose buvo atliktas naudojant PCoA analizę.



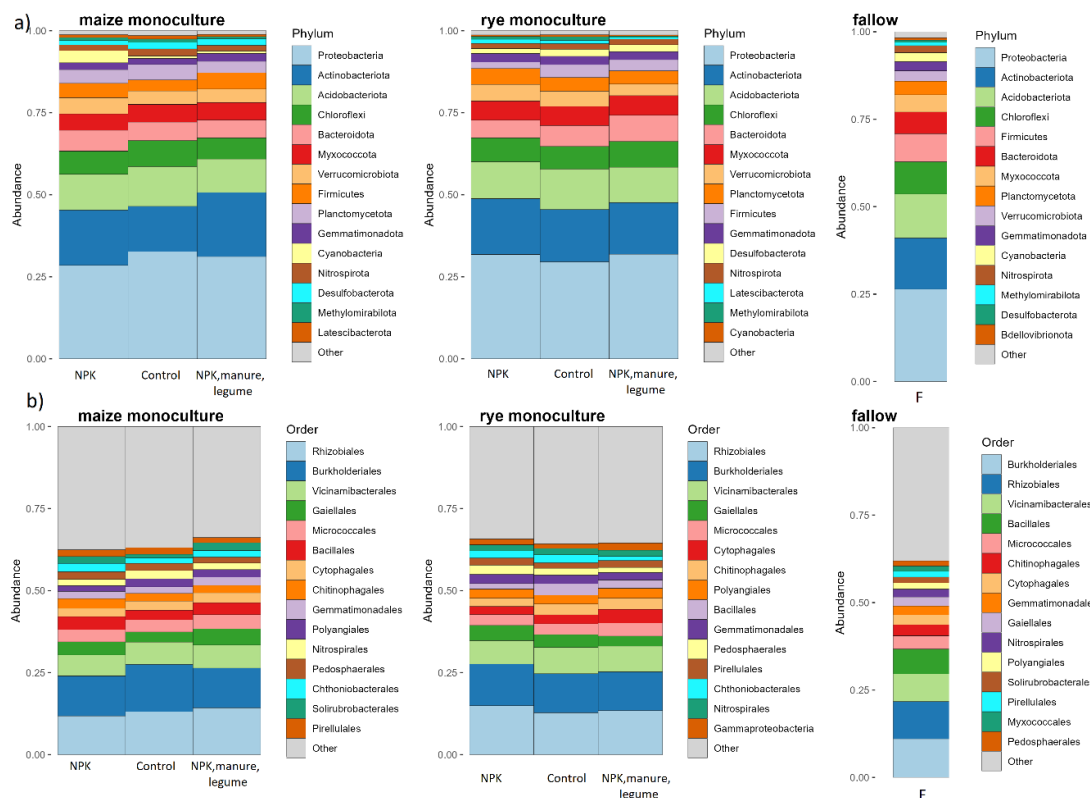
3.39 pav. Bakterijų (a) ir grybų (b) įvairovės įvertinimas pagal veiksmingų rūšių skaičių (ENS) šiose monokultūrų grupėse: RC – ruginių monokultūra be trąšų, RNP – ruginių monokultūra, tręštas NPK, RML – rugiai, tręšti NPK, mėšlu ir ankštiniais augalais sėjomainoje, F – nuolatinis juodasis pūdymas, MC – kukurūzų monokultūra be trąšų, MNP – kukurūzų monokultūra, tręštas NPK, MML – kukurūzai, tręšti NPK, mėšlu ir ankštiniais augalais sėjomainoje.

PCoA grafikai pateikti 3.40 paveiksle. Bakterijų bendrijų analizė (a) parodė, kad šis parametras atskyrė nuolatinio juodojo pūdymo variantą pagal 2 ašį (<-0,3 %). Kiti tyrimo variantai buvo sugrupuoti 0,1 % virš 2 ašies. Išsamiau mėginiai buvo sugrupuoti pagal augalus (kukurūzai arba rugiai), o ne pagal tręšimo strategijas. Kitokia tendencija buvo pastebėta grybų bendrijų analizėse (b), kur tyrimo variantai buvo sugrupuoti pagal skirtingus augalus (kukurūzai/rugiai) pagal 1 ašį. Atsižvelgiant į grybų bendrijos klasterio rezultatus, buvo pastebėta, kad nuolatinio juodojo pūdymo variantas buvo arčiau ruginių monokultūros klasterių (abu yra 0,0 % žemiau 1 ašies) nei kukurūzų monokultūros variantas (0,2 % virš 1 ašies). Šie santykių rezultatai parodė, kad dirvožemio mėginiai iš įvairių augalų pasėlių, taip pat tręšimo strategijos skyrėsi bakterijų ir grybų bendrijų struktūromis.



3.40 pav. Bakterijų (a) ir grybų (b) bendrijų beta įvairovės analizė. PCoA diagramos, pateikiančios šių variantų įvertinimus: pūdymas, ruginių ir kukurūzų monokultūra, kontrolė, NPK, NPK su mėšlu ir ankštiniais augalais.

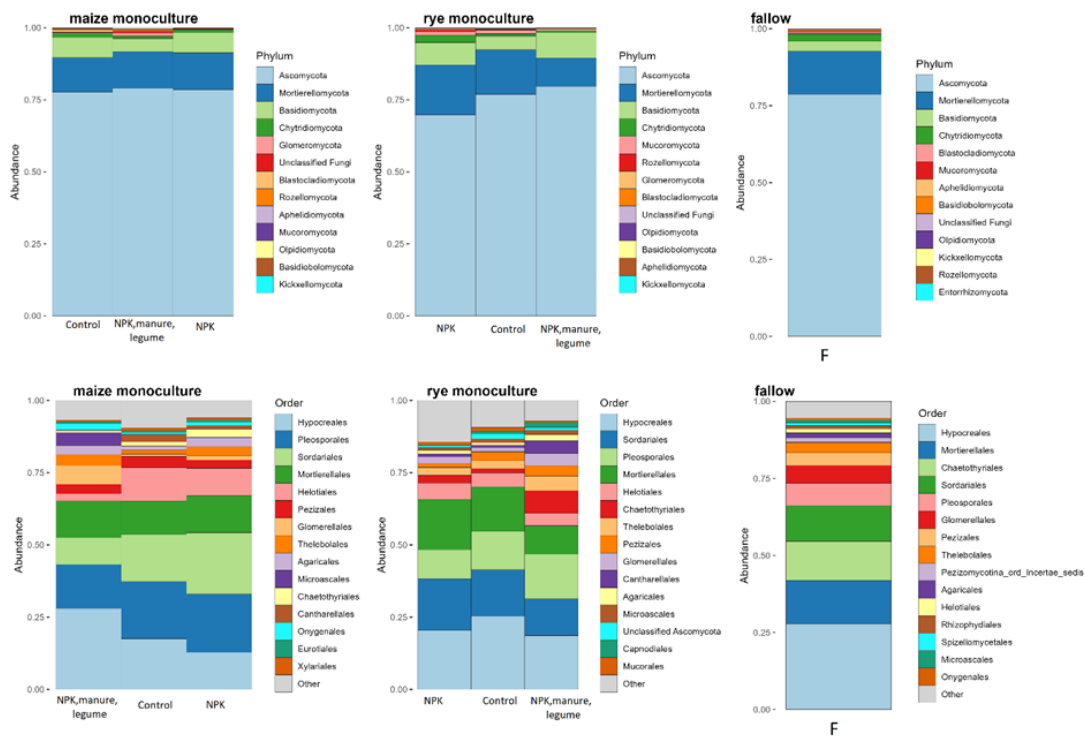
Nustatyti alfa ir beta įvairovės skirtumai dirvožemio mikrobiomo bendruomenių struktūroje buvo pagrindas tirti taksonominės struktūros ir taksonų santykinio gausumo skirtumus. Todėl, kaip kitas metagenominio metodo etapas, bakterijų ir grybų taksonominė įvairovė buvo suskirstyta ir pateikta atitinkamai 3.41 ir 3.42 paveiksluose.



3.41 pav. Taksonominės bakterijų gausos dirvožemyje vizualizacija pagal tipą (a) ir rūšį (b), kai bendra santykinė gausa yra >3 % su valdymo sistema (monopasėliai ir pūdymas bei tręšimo strategijos: kontrolė, NPK, NPK-mėšlas-ankštiniai).

Apskritai, bakterijų taksonominės analizės (3.41 pav.) parodė, kad iš visų tiriamų variantų (kukurūzai, rugiai ir pūdymas) gausiausi identifikuoti bakterijų skyriai priklausė šiems keturiems skyriams: *Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Acidobacteria* ir *Chloroflexi*, kurios sudarė atitinkamai ~25 %, ~20 %, ~15 % ir ~10 % visų sekvencinių skaitymų. Visuose mėginiuose buvo labai panašus ir didelis bakterijų skyrių gausumas, kuris iš viso sudarė ~60–70 % bendro santykinio gausumo. Skirtumai tarp tiriamų metodų buvo pastebėti kitų aptiktų bakterijų skyrių, kurių gausumas buvo mažesnis, atveju. Konkrečiai, monopasėlių variantuose (kukurūzai ir rugiai kiekvienoje tręšimo strategijoje) atveju *Bacteroidota*, *Myxococcota* ir *Verrucomicrobiota* buvo gausūs panašiu lygiu (~5–10 %), ir tarp tręšimo strategijų nebuvo pastebima reikšmingų skirtumų. Taip pat buvo pastebėta, kad aptikti kitų bakterijų skyriai: *Firmicutes*, *Planctomycetota*, *Gemmatimonadota*, *Nitrospirata*, *Methyloirabilota*, *Latescibacterota* ir *Cyanobacteria* buvo gausios kiekvienoje monokultūrinėje sistemoje panašiu lygiu, tačiau bendras santykinis gausumas buvo įvertintas apie 10–15 %. Iš visų nustatytų bakterijų skyrių vienas (*Bdellovibrionota*) buvo pastebėtas tik nuolatinio juodojo pūdymo dirvožemio mėginyje. Nustatyta, kad trys iš jų (*Rhizobiales*, *Burkholderiales* ir *Vicinamibacterales*) buvo gausiausi kiekvienoje grupėje ir sudarė labai panašų procentinį santykį (12 %). Ketvirta dominuojanti grupė skyrėsi monopasėlių sistemoje ir juodojo pūdymo pūdymo dirvožemyje. *Gaiellales* (~5 %) buvo identifikuota monopasėlių dirvožemio mėginiuose, o dirvožemyje po nuolatinio juodojo pūdymo šios eilės bakterijų gausumas buvo palyginti mažai reikšmingas. Be to, vienos bakterijų eilės (*Bacillales*) gausumas dirvonuojančio dirvožemio mėginiuose buvo santykinai didesnis nei monopasėlių dirvožemio mėginiuose. Bakterijų eilių analizė taip pat parodė vieną eilę, kuri buvo būdinga dirvonuojančiam dirvožemiui – *Myxococcales*; tačiau šio taksono gausumas buvo šiek tiek mažiau reikšmingas.

Taip pat buvo atliktos išsamios grybų taksonominės analizės tiriamame dirvožemyje ir pateiktos 3.42 paveiksle.

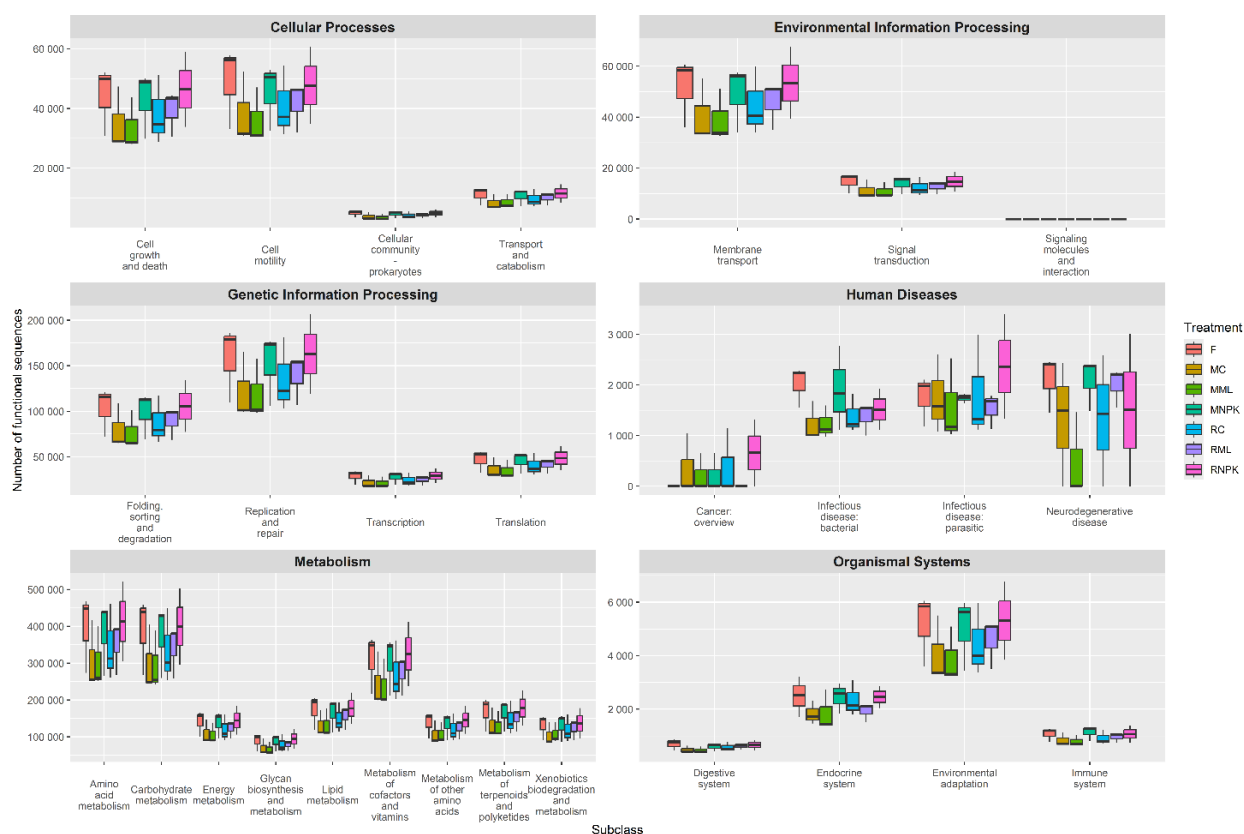


3.42 pav. Taksonominės grybų gausos dirvožemyje vizualizacija pagal tipą (a) ir rūšį (b), kai bendra santykinė gausa yra $>3\%$ su valdymo sistema (monopasėliai ir pūdymas bei tręšimo strategijos: kontrolė, NPK, NPK-mėšlas-ankštiniai).

Grybų bendrijos struktūros pagal skyrius ir taksonominį lygį stulpelinės diagramos parodė keletą išskirtinių punktų tiriamose monopasėliuose ir pūdymuose. Grybų bendrijose dominavo Ascomycota ($>75\%$), Mortierellomycota (15%) ir Basidiomycota (10%) skyriai kiekvienoje eksperimento varianto grupėje. Kiti identifikuoti skyriai, tokie kaip *Chytridiomycota*, *Blastidiomycota*, *Rozellomycota*, *Mucoromycota* ir *Olpidiomycota*, buvo aptikti visuose dirvožemio mėginiuose, tačiau šių skyrių gausumas nebuvo labai reikšmingas. Taksonominės analizės rodo, kad dirvožemio kokybės valdymo variantui po pūdymo būdingi du skyriai: *Basidiobolomycota* ir *Entorrhizomycota*, o monopasėlių variantui – taip pat du skyriai: *Glomeromycota* ir *Kickxellomycota*. Eilės lygiu (3.42 b pav.) buvo nustatyta keletas charakteringų skirtumų tarp nuolatinio juodojo pūdymo ir monopasėlių variantų. Tarp identifikuotų eilių Hypocreales buvo dominuojanti kiekviename variante (atitinkamai $25\text{--}15\%$, $20\text{--}25\%$ ir 27% kukurūzų, rugių monopasėliuose ir pūdymuose). Pleosporiales ir Sordariales buvo kiti gausiausi skyriai monopasėlių dirvožemio mėginiuose. Be to, 55 metų monopasėlis turėjo didesnę poveikį *Mortierellales* ir *Helotiales*, taip pat buvo pastebėti skirtumai tarp tręšimo strategijų. Ypač *Mortierellales* pasitaikė kukurūzų monopasėlyje panašiu lygiu ($15\text{--}18\%$), o rugių monokultūroje jis buvo didesnis ($12\text{--}20\%$). Mažiausias gausumas (12%) buvo pastebėtas naudojant NPK, mėšlą ir ankštinius augalus, kaip trąšą. Be to, Sordariales kiekis sumažėjo dirvožemyje, tręštame NPK, mėšlu ir ankštiniais (kukurūzų ir rugių pasėliams). Taip pat buvo nustatytas reikšmingas Helotiales grybų eilės gausėjimas skirtingose kukurūzų tręšimo strategijose. Rezultatai parodė, kad nėra reikšmingų skirtumų dirvožemyje tarp kontrolinio ir NPK variantų, tačiau aiškiai sumažėjo dirvožemio mėginiuose su NPK, mėšlu ir ankštiniais augalais. Taip pat pastebima, kad ši grybų eilė buvo nedominuojantis grybas pūdymuose ($<5\%$). Panaši tendencija buvo pastebėta rugių monopasėlyje *Chaetothyriales* eilės atžvilgiu, kur ji buvo gausiausia dirvožemyje, tręšiamame NPK, mėšlu ir ankštiniais augalais, ir mažai paplitusi ($<5\%$) kontroliniame ir NPK tręšiamame dirvožemyje. Tačiau ši grybų eilė buvo aptikta pūdymuose (kaip viena iš keturių dominuojančių grybų eilių, $\sim 25\%$). *Cantharellales* eilė buvo būdinga monopasėliams, o *Spicellomycetales*, *Rhizopydiales* ir *Pezizomycotina* ord. *Incertae sedis* – pūdymui. Taip pat buvo pastebėtos atskiros

eilės, tokios kaip *Xylariales*, *Eurotiales*, augančios kukurūzų monopasėlyje ir *Mucorales*, *Capnodiales*, būdingos rugių monopasėliams.

Gauti sekvenavimo rezultatai buvo apdoroti naudojant PICRUSt (Phylogenetic Investigation of Communities by Reconstruction of Unobserved States) programą, naudojant KEGG duomenų bazę ir FUNGuild. Bakterijų funkcinis profilis buvo prognozuotas remiantis 16S rRNA sekvencijų duomenų rinkiniais. Genai buvo suskirstyti į šešias pagrindines klases: ląstelių procesai, aplinkos informacijos apdorojimas, genetinės informacijos apdorojimas, žmogaus ligos, metabolizmas ir organizmo sistemos. Šiose grupėse buvo išskirti poklasiai, kurie pateikti 3.43 paveiksle. Apskritai, genai, susiję su ląstelių augimu ir mirtimi, ląstelių judrumu, membranų transportu, ir pagrindinės klasės, metabolizmas ir genetinės informacijos apdorojimas buvo įvertinti kaip labai gausūs. Buvo pastebėtos kelios įdomios tendencijos: stulpelinės diagramos parodė, kad didžiausios reikšmingos prognozės buvo stebimos dirvožemio pūdymo ir monokultūros su NPK tręšimu (rugiai ir kukurūzai) atvejais. Palyginti su kitais, variantai (RC, RML ir MC bei MML) prognozuojamų genų gausumo atžvilgiu parodė mažesnę įvairovę. Tarp genų, kurie, kaip prognozuojama, yra susiję su metabolizmu, gausiausi yra trys poklasiai: amino rūgščių, angliavandenių, kofaktorių ir vitaminų metabolizmas. Įdomus šio profiliavimo aspektas yra ir didelis genų, prognozuojamų kaip susijusių su prisitaikymu prie aplinkos ir endokrininės sistemos (pagrindinėje klasėje „organizmo sistemos“), gausumas.

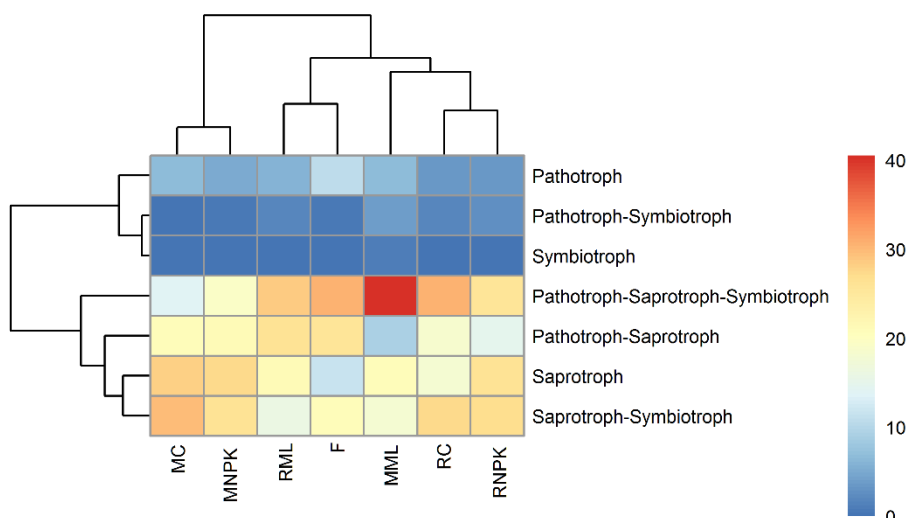


3.43 pav. KEGG kelių prognozavimas naudojant PICRUSt metodą, siekiant įvertinti bakterijų bendrųjų potencialų funkcionalumą. Nėra pastebėta reikšmingų statistinių skirtumų.

Paaiškinimai: MML – kukurūzai, tręšti NPK, mėšlu ir ankštiniais augalais sėjomainoje, RML – rugiai, tręšti NPK, mėšlu ir ankštiniais augalais sėjomainoje, MNPK – kukurūzų monopasėlis, tręštas NPK, RNPk – rugių monopasėlis, tręštas NPK, MC – kukurūzų monopasėlis be trąšų, RC – rugių monopasėlis be trąšų, F – nuolatinis juodasis pūdymas.

FunGuild duomenų bazė, skirta grybų ITS genui, buvo naudojama grybų bendruomenių trofinių režimų ir funkcinų gildijų prognozavimui. Remiantis dabartiniais literatūros šaltiniais, duomenys buvo suskirstyti į pagrindines grupes pagal jų funkcionalumą, o rezultatai pateikti šilumos žemėlapyje (3.44 pav.). Tyrimas skyrėsi pagal grybų funkcinų grupių gausumą. Rezultatai parodė, kad pūdymas padidino patotrofų gausumą (10 %) ir sumažino saprotrofų

gausumą (12 %). Tuo pačiu metu patotrofų: augalų patogenų grybų grupė parodė padidėjimą visose monokultūrų variantuose (>94 %), o pūdymo atveju jis buvo įvertintas žymiai mažesniu lygiu (80 %).



3.44 pav. FUNGuild sugeneruotų grybų funkcinį grupių sudėties variacijos.

Paaikškinimai: MML – kukurūzai, tręšti NPK, mėšlu ir ankštiniais augalais sėjomainoje, RML – rugiai, tręšti NPK, mėšlu ir ankštiniais augalais sėjomainoje, MNPK – kukurūzų monopasėlis, tręštas NPK, RNPK – rugių monopasėlis, tręštas NPK, MC – kukurūzų monopasėlis be trąšų, RC – rugių monopasėlis be trąšų, F – nuolatinis juodasis pūdymas.

Remiantis 31 anglies substrato panaudojimo lygiu ECO Biolog plokštelėje, buvo įvertintas dirvožemio mikroorganizmų bendrųjų funkcinis įvairumas. Gauti įvairovės indeksų rezultatai pateikiami 3.14 lentelėje. Mažiausios funkcinės įvairovės indeksų vertės buvo užregistruotos dirvožemio, kuris buvo paliktas pūdymui, atveju, o santykinai didesnė įvairovė buvo pastebėta monopasėlio dirvožemio atveju. Tačiau statistiniai skirtumai buvo apskaičiuoti tik dirvožemiui, kuris buvo paliktas pūdymui ir rugių monopasėlyje, tręšiamame mėšlu, NPK ir ankštiniais augalais. Siekiant giliau išanalizuoti metabolinio potencialo aktyvumo profilį, buvo atliktos klasterinės analizės (3.45 pav.). Pateiktas šilumos žemėlapis parodė, kad dauguma anglies substratų tiriamame variante buvo panaudoti mikroorganizmų. Tik keletas substratų nebuvo metabolizuoti (2-hidroksibenzoinė rūgštis, DL-a-glicerolfosfatas, a-ketobutirino rūgštis ir D-galakturoninė rūgštis). Taip pat buvo pastebėta, kad susiformavo trylikos substratų grupė. Ši grupė pasižymėjo aukščiausiu panaudojimo lygiu (≥ 1) ir apėmė daugiausia amino rūgštis, keletą angliavandenių ir polimerų (Tween 40 ir Tween 80). Antroji substratų grupė buvo žymiai mažiau metabolizuojama. Išbandytų tręšimo strategijų analizė parodė, kad išskirtinės dendrogramos gautos pūdymo (F) ir NPK tręšiamų kukurūzų (MML), su mėšlu ir ankštiniais augalais variantuose. Potencialių fiziologinių profilių analizė rodo, kad didžiausias substrato katabolizmas būdingas amino rūgštims, ypač asparaginui, argininui ir serinui. Naujos mokslinės ataskaitos rodo, kad šių tipų substratai laikomi signalinėmis molekulėmis ir yra dalis cheminės kalbos, kurią mikroorganizmai naudoja bendrauti ir daryti įtaką vieni kitiems. Be to, amino rūgštys yra daugelio augalams būtinų substratų, ypač hormonų/antibiotikų, sintezės pirmtakai arba katalizatoriai. Didžiausias šių substratų katabolizmas buvo pastebėtas pūdymo ir kukurūzų monopasėlių variantuose. Mikroorganizmų, ypač prokariotų ir eukariotų, sąveika yra labai svarbi dirvožemio gyvybinėms funkcijoms (maistinių medžiagų apykaitai, organinių medžiagų skilimui ir augalų atsparumo gerinimui). Be to, pūdymais užimto dirvožemio bendrijos katabolizavo daugiausia pirmojo susidariusio klasterio substratus, o kitų substratų panaudojimo lygis buvo žymiai žemesnis nei monopasėlių atveju. Šie rezultatai labai gerai atitinka funkcinį genų prognozę, pagrįstą

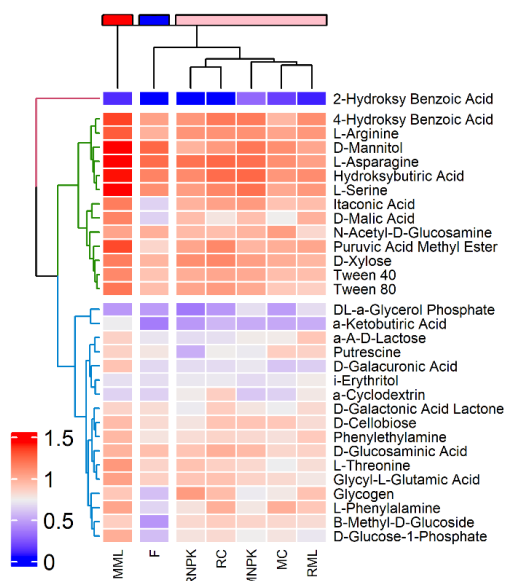
sekvenavimo duomenimis, kur buvo prognozuojama, kad didžiausias genų gausumas, susijęs su metabolizmo klase, yra atsakingas už aminorūgščių ir angliavandenių metabolizmą.

3.14 lentelė. Įvairovės indeksai: R – gausumas (substratų, kurių vidutinės absorbcijos vertės > 0,25, skaičius), AWCD – vidutinis spalvos intensyvumas, H – Šanono indeksas, ENS – efektyvusis substratų skaičius, metabolizuotų substratų skaičius (n=3) monokultūrai ir pūdymui.

	R	AWCD	H	ENS
MML	27.44 ±2.55 a	1.22 ±0.23 a	3.27 ±0.09 ab	26.3 ±2.27 ab
RML	29 ±1.32 a	1.03 ±0.21 a	3.34 ±0.03 a	28.29 ±0.89 a
MNPK	27.33 ±3.08 a	1.04 ±0.18 a	3.26 ±0.1 ab	26.18 ±2.6 ab
RNPK	27.22 ±3.35 a	1.01 ±0.27 a	3.26 ±0.12 ab	26.32 ±2.71 ab
MC	27.33 ±2.5 a	1.00 ±0.32 a	3.29 ±0.06 ab	26.78 ±1.61 ab
RC	27.67 ±2.29 a	1.06 ±0.18 a	3.29 ±0.06 ab	26.79 ±1.74 ab
F	26.00 ±2.92 a	0.96 ±0.30 a	3.19 ±0.08 b	24.38 ±2.00 b

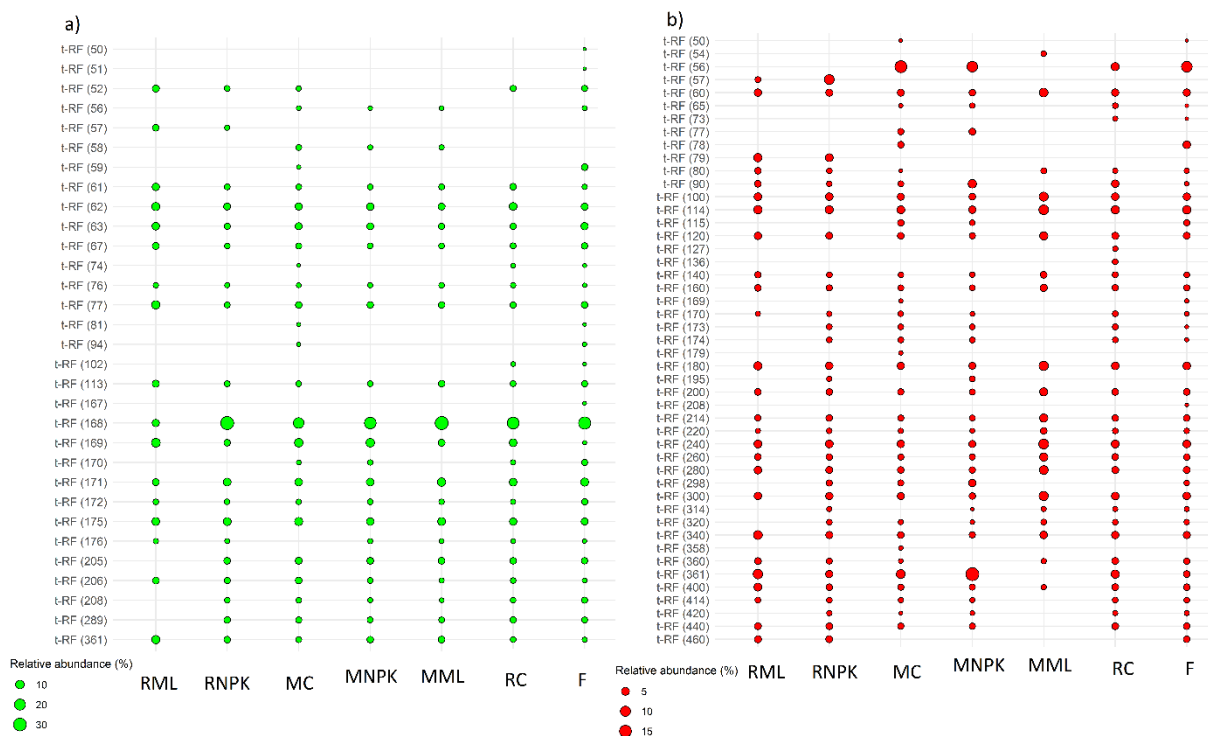
Mažosios raidės reiškia esminius skirtumus (Tukey HSD testo rezultatai 0,05 lygiu).

Paaiškinimai: MML – kukurūzai, tręšti NPK, mėšlu ir ankštiniai augalai sėjomainoje, RML – rugiai, tręšti NPK, mėšlu ir ankštiniai augalai sėjomainoje, MNPK – kukurūzų monopasėlis, tręštas NPK, RNPK – rugių monopasėlis, tręštas NPK, MC – kukurūzų monopasėlis be trąšų, RC – rugių monopasėlis be trąšų, F – nuolatinis juodasis pūdymas.



3.45 pav. Šilumos žemėlapis, kuriame pateiktas anglies substratų panaudojimo profilis. Paaiškinimai: MML – kukurūzai, tręšti NPK, mėšlu ir ankštiniai augalai sėjomainoje, RML – rugiai, tręšti NPK, mėšlu ir ankštiniai augalai sėjomainoje, MNPK – kukurūzų monopasėlis, tręštas NPK, RNPK – rugių monopasėlis, tręštas NPK, MC – kukurūzų monopasėlis be trąšų, RC – rugių monopasėlis be trąšų, F – nuolatinis juodasis pūdymas.

Bakterijų ir archėjų bendrijų įvairovė taip pat buvo apibūdinta remiantis ribojimo profiliu. Vertinimas buvo atliktas remiantis 16S rDNA fragmentu. Ribojimo profilis pateiktas 3.46 paveiksle.

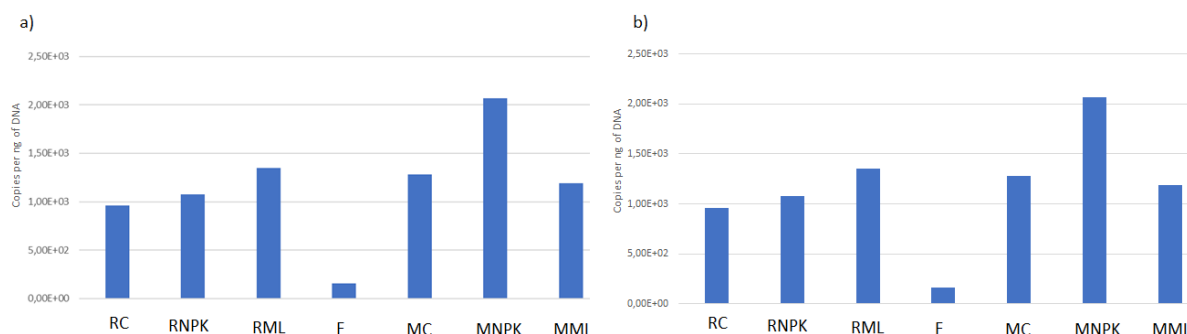


3.46 pav. Grafos, kuriose pateiktas bakterijų (a) ir archėjų (b) bendriųjų galinių ribojimo fragmentų skaičius ir santykinis gausumas.

Paaiškinimai: t-RF – galinis ribojimo fragmentas (dydis bazinėmis poromis), variantai: MML – kukurūzai, tręšti NPK, mėšlu ir ankštiniai augalai sėjomainoje, RML – rugiai, tręšti NPK, mėšlu ir ankštiniai augalai sėjomainoje, MNPK – kukurūzų monopasėlis, tręštas NPK, RNPK – rugių monopasėlis, tręštas NPK, MC – kukurūzų monopasėlis be trąšų, RC – rugių monopasėlis be trąšų, F – nuolatinis juodasis pūdyimas.

Genetinis pirštų atspaudų profilis parodė, kad pasėlių sistemos ir tręšimo strategijos formavo prokariotų bendrijos struktūrą. Apskritai, kiekviename dirvožemio mėginyje buvo pastebimų bendrų fragmentų, net ir esant panašiam gausumui. Tačiau buvo ir keletas pastebimų charakteringų fragmentų, būdingų tam tikriems apdorojimo būdams, pavyzdžiui, bakterijų t-RF(58) buvimas tik kukurūzų monopasėlių variantuose (MC, MNPK ir MML). Nenaudojamas dirvožemis išsiskyrė bakterijų t-RF(50), (51), (81) ir (94) buvimu. Gauti prokariotų bendrijų ribojimo profiliai labai skyrėsi fragmentų dydžiu, nors ribojimo fragmentų gausa buvo panaši visose variantuose.

Kiekybinė realaus laiko PCR analizė RubisCO kodavimo genams ir azoto oksido reduktazei (nosZ) atskleidė aptinkamų genų kopijų skirtumus, kurie pateikiami 3.47 paveiksle.



3.47 pav. NosZ (a) ir cbbL (b) kiekybinis įvertinimas qPCR metodu tiriamuose dirvožemio naudojimo variantuose.

Paaiškinimai: MML – kukurūzai, tręšti NPK, mėšlu ir ankštiniai augalai sėjomainoje, RML – rugiai, tręšti NPK, mėšlu ir ankštiniai augalai sėjomainoje, MNPK – kukurūzų monopasėlis, tręštas NPK, RNPK – rugių monopasėlis, tręštas NPK, MC – kukurūzų monopasėlis be trąšų, RC – rugių monopasėlis be trąšų, F – nuolatinis juodasis pūdyimas.

Esminiai skirtumai buvo pastebėti genų, dalyvaujančių N ir C cikluose (nosZ ir cbbLR), gausumoje, priklausomai nuo dirvožemio naudojimo būdo. Nuolatinio juodojo pūdymo variantas pasižymėjo labai mažu kopijų skaičiumi, palyginti su monopasėliais, genų kopijų kiekis buvo įvertintas vidutinėmis vertėmis $1,5 \times 10^2$ vienam reakcijos mišiniui, tuo tarpu monopasėlių kopijų skaičius buvo įvertintas virš $1,0 \times 10^3$. Abiem vertintais žymenimis buvo pastebėtas analogiškas modelis. Daugiausia genų kopijų ($>2,0 \times 10^3$) buvo aptikta kukurūzų monopasėlyje, dirvožemyje tręšiamame NPK (MNPK). Rugių monopasėlyje gauti rezultatai buvo panašesni, ypač RC ir RNPK objektų, kurių genų kopijų skaičius buvo įvertintas $\sim 1,0 \times 10^3$.

Apibendrinant galime teigti, kad tyrime buvo vertinama mikrobiomo būklė dirvožemyje, atsižvelgiant į įvairias dirvožemio naudojimo (kokybės valdymo) sistemas (monopasėliai ir nuolatinis juodasis pūdyimas) bei tręšimo strategijas. Tyrime nagrinėjome mikrobus bendrųjų struktūrą, įvairovę, funkcinį profilį, metabolinį profilį ir dirvožemio fermentų aktyvumą. Šie biologiniai parametrai leidžia įvertinti dirvožemio kokybę pagal tvaraus žemės ūkio principus. Nustatyta, kad dirvožemio mikroorganizmai (bakterijos, grybai ir archėjos) atlieka svarbų vaidmenį dirvožemio procesuose, yra svarbūs augalų augimui (Marusenko et al. 2013) ir jautrūs aplinkos pokyčiams. Vienas iš pagrindinių dirvožemio naudojimo sistemos aspektų yra pasėlių sistema. Šiame straipsnyje vertiname monokultūros įtaką svarbiems dirvožemio mikrobiologiniams parametrams.

Taikant didelio našumo sekvenavimo technologijas, pvz., „Illumina MiSeq“, galima įvertinti bakterijų ir grybų bendrijos struktūrą tiriamame dirvožemyje, kuriame 55 metus buvo auginami tik kukurūzai ir rugiai bei pūdymu užimto lauko variante. Bakterijų ir grybų gausa buvo akivaizdžiai skirtinga tarp rugių ir kukurūzų monokultūros ir juodo pūdymo. Buvo nustatyta, kad efektyvus grybų rūšių skaičius pūdymo variante yra mažesnis nei monokultūros sistemoje; kita vertus, buvo padaryta išvada dėl bakterijų bendrijos. Šie rezultatai rodo, kad ilgalaikis pūdyimas gali sumažinti grybų įvairovę ir gausumą, o kita vertus, padidinti bakterijų bendrijos įvairovę. Tuo pačiu metu dirvožemio grybų įvairovė padidėjo monokultūrų variantuose. Šie rezultatai yra panašūs į kitus mokslinius rezultatus. Liu ir kt. (2019) nustatė didesnę dirvožemio grybų įvairovę nuolatiniam sojų, žemės riešutų (Bai ir kt., 2015) ir kukurūzų (Wang ir kt., 2015) auginime. Šios pastebėtos tendencijos, kai monokultūrų variantuose mažėja bakterijų ir didėja grybų gausa, gali būti dirvožemyje esančių augalų patogenų, ypač patogeninių grybų, paplitimo skatinimo rezultatas (Peralta et al., 2018). Didelio našumo sekvenavimo tyrimai parodė, kad mūsų rezultatai yra panašūs į ankstesnių tyrimų rezultatus ir atskleidė, kad ilgalaikis nuolatinis auginimas veda prie bakterijų mažėjimo ir grybų įvairovės didėjimo (Dong et al., 2016; Liu et al., 2020). Po ilgalaikio monokultūrų auginimo pastebėta, kad pagrindiniai dirvožemio mikroorganizmai pasikeitė iš bakterijų į grybus. Be to, buvo nustatyta, kad grybų kiekis ir įvairovė taip pat yra veiksnys, neigiamai susijęs su dirvožemio sveikatos kokybe (Chen et al. 2022). Stebėjimai, atlikti dirvožemiui, kuris buvo paliktas pūdymui, parodė, kad ši auginimo sistema galėtų būti tas pats sprendimas, padedantis atkurti dirvožemio mikrobiologinę pusiausvyrą. Be to, analizės rezultatai rodo, kad auginimo sistema tapo pagrindiniu bakterijų ir grybų rūšių pokyčių veiksnium, o ne tręšimo strategijos.

MiSeq analizė parodė, kad monopasėlių sistemos pakeitė bakterijų ir grybų bendrijų sudėtį dirvožemyje (3.42 ir 3.43 pav.). Pirmojo iš keturių dominuojančių bakterijų skyrių gausa buvo labai panaši kiekviename tiriamame dirvožemyje, tai buvo Proteobacteria, Actinobacteria, Acidobacteria ir Chloroflexi. Šie identifikuoti bakterijų skyriai yra atsakingi už pagrindinius augalams būtinus biologinius procesus dirvožemyje, pavyzdžiui, anglies ciklą ir azoto fiksavimą (Jiménez et al., 2012, Ai et al., 2015, Shi et al., 2020a). Be to, celiuliozės skilimas (Pankratov et al., 2011), anglies metabolizmas (Pankratov et al., 2008) ir geležies apykaita (Lu et al., 2010) yra svarbūs procesai, kuriuos atlieka Acidobacteria. Buvo nustatyta, kad šie bakterijų skyriai yra plačiai paplitę dirvožemyje įvairiomis sąlygomis ir kituose augaluose (Wang et al., 2019; Delgado et al., 2018). Be to, Actinobacteria ir Chloroflexi skyrių nariai buvo įvertinti kaip oligotrofų skyriai (Duan et al., 2022), o tai galėtų būti riboto maistinių medžiagų kiekio ir riboto anglies kiekio sąlygų rodiklis (Sun et al., 2019). Todėl galima daryti išvadą, kad monokultūrų auginimo sistemos gali

sumažinti dirvožemio maistinių medžiagų kiekį ir kai kurių mikrobo taksonų paplitimą bei turėti didelę įtaką dirvožemio kokybei. Šiame tyrime buvo nustatyti nedideli skirtumai tarp kitų aptiktų skyrių. Įdomus atradimas buvo padarytas dėl plėšriųjų bakterijų grupės, kuri monokultūrų auginimo aplinkoje atstovauja Myxococcota, o pūdymuose – Myxococcota ir Bdellovibrionota (Zhao et al., 2019). Šios plėšriosios bakterijos yra laikomos svarbia jėga, formuojančia bakterijų bendrijos sudėtį dirvožemyje, nes jos turi gebėjimą medžioti ir naikinti kitas bakterijas, kad gautų energijos išteklių (Sockett 2009). Išsamesnės analizės rodo, kad Bacillales yra gausiau paplitę dirvožemyje. Šios bakterijų grupės dominavimas yra susijęs su anglies šaltiniu, daugelis šios grupės rūšių sąveikauja su dirvožemio organizmais, kolonizuoja šaknis ir sudaro simbiozę su augalais (LIT). Bacillales taip pat apibrėžiamos kaip augalams naudingos rizobakterijos, kurios gali skatinti augalų augimą ir didinti atsparumą patogenams. Kita vertus, auginant monokultūras dirvožemyje buvo nustatyta didelė Rhizobiales eilės bakterijų gausa. Šios bakterijos taip pat yra glaudžiai susijusios su augalų šaknimis, o tai rodo, kad ši grupė gali būti atspari augalų šaknų autotoksiškumui. Siekiant apibūdinti bakterijų bendrijas dirvožemyje, buvo atliktas išsamesnis tyrimas, naudojant PICRUSt genų prognozavimo metodą. Genai, dalyvaujantys metabolizme ir genetinės informacijos apdorojime, buvo gausiau paplitę pūdymuose ir monokultūrose, tręšiamose NPK. Šis energijos metabolizmas, susijęs su amino rūgščių ir angliavandenių metabolizmu, reguliuojančių procesų gausėjimas koreliuoja su gautais taksonominiais rezultatais. Jie yra gausiau randami F ir RNPK, MNPK prognozuoja didesnę potencialą mikrobo apdorojimo procesuose, pvz., anglies ir azoto fiksavime (Smith et al., 2016). Šis pastebėjimas gali būti mažesnio dirvožemio sutrikdymo, atsirandančio dėl monokultūrų, ir mikrobo metabolizmo procesų, susijusių su svarbiomis maistinėmis medžiagomis, pagreitinimo rezultatas. Kita vertus, pastebėtas didesnis genų, susijusių su amino rūgščių metabolizmu ir prisitaikymu prie aplinkos, gausumas yra atsakingas už ekologinę reakciją į stresą (Fozo ir Quivey, 2004).

Daugybė tyrimų parodė, kad dirvožemio grybų augimas ir gausa labiau reaguoja į aplinkos pokyčius nei bakterijos (Fan et al., 2022; Lekberg et al., 2021). Atlikus grybų taksonominę analizę skyrių lygiu buvo nustatyta, kad kiekviename tiriamame variante gausiausi grybai buvo Ascomycota, Mortierellomycota ir Basidiomycota. Ascomycota ir Basidiomycota skyrių grybai yra žinomi kaip įvairių fermentų, atsakingų už organinių medžiagų skilimą, gamintojai, todėl jie pasižymi didžiausiu santykiniu gausumu visose tiriamose variantuose. Verta paminėti, kad kai kurie tyrėjai nustatė, jog šiam skyriui yra būdingi stresui atsparūs genai (Biggs-Weber et al., 2020).

Antrasis gausiausias grybų skyrius buvo Mortierellomycota, kuris skatina fitohormonų gamybą ir lignino bei karboksilinių junginių skilimą (Zhang et al., 2022). Šiame tyrime buvo identifikuoti keli Glomeromycota skyriui priklausantys nariai, kurie buvo klasifikuoti kaip potencialiai naudingi grybai. Šiam skyriui priklauso naudingos rūšys, pvz., arbuskulinių mikorizinių grybų (AMF), kurie buvo aptikti rugių ir kukurūzų monokultūrų sistemose. Priešingai, šio skyriaus nariai nebuvo rasti dirvožemyje, kuris buvo paliktas pūdymui. Šie du skyriai buvo žinomi kaip augalų augimą skatinantys grybai (Ozimek ir Hanaka, 2021) ir dažnai randami dirvožemyje (masėje ir rizosferoje) bei ant augalų (Frąc ir kt., 2021). Šie rezultatai atitinka FUNGuild rezultatus: Mortierellomycota yra saprotrofiniai grybai, gebantys gauti anglies šaltinius augimui ir vystymuisi skaidydami chitiną ir hemiceliuliozę (Frąc et al., 2021; Ozimek ir Hanaka, 2021). Šių pagrindinių skyrių labai didelis gausumas rodo, kad jie labai prisitaiko prie kukurūzų ir rugių monokultūros ir yra atsparūs neigiamiems dirvožemio pokyčiams, atsirandantiems dėl ilgalaikio dirbimo. Panaši grybų taksonominė struktūra kukurūzų monokultūroje buvo nustatyta Wolińska ir kt. tyrimuose (2022). Didelis Mortierellomycota gausumas taip pat įdomus dėl šios priežasties. Šio skyriaus nariai yra grybai, stiprinantys mutualistinius santykius su kitais mikroorganizmais (taip pat bakterijomis) ir formuojantys dirvožemio mikrobiologines sąveikas. Manoma, kad tai gali būti pagrindinis elementas mikrobiologinėje komunikacijoje ir neabejotinai turi įtakos mikrobiologiniams kvorumo jutimo mechanizmams. Todėl, žemės ūkio dirvožemio biologijos požiūriu, Mortierellomycota buvimas turi teigiamą poveikį augalų ir dirvožemio sveikatai, ypač monokultūrų sistemoje (Zhank ir kt., 2020). Be to, Wolińska ir kt. (2022), remdamiesi paskelbtais rezultatais, rekomenduoja Mortierellomycota gausumą naudoti kaip jautrumo ilgalaikiam kukurūzų auginimui rodiklį. Apibendrinant, palyginus bakterijų ir grybų

bendrijų struktūros gausumą monokultūrose ir pūdymuose, buvo nustatytas didesnis bakterijų/grybų skyrių panašumas monokultūrų auginimo sąlygomis (rugiai ir kukurūzai, taip pat įvairios tręšimo strategijos).

Pastaraisiais metais populiarėja molekulinės technikos, pavyzdžiui, NGS, tačiau biocheminiai, funkciniai ir fermentų tyrimo metodai vis dar laikomi svarbiais ir jautriais dirvožemio aplinkos būklės veiksniais.

Fermentų veiklos ir metabolinio potencialo bendri rezultatai apima dirvožemio mikrobus bendrijų biochemines savybes. Biologinio metodo rezultatai, taip pat fermentų aktyvumas rodo dirvožemio mikroorganizmų metabolinę ir biocheminę veiklą monokultūrų sistemose ir pūdymo sąlygomis. 1 lentelėje pateikti įvairovės indeksai, tokie kaip Shannon, Richness ir AWCD, atitinka dirvožemio mikroorganizmų skaičių ir rūšis. Anglies substrato metabolizmo modelis rodo potencialias dirvožemio mikrobus populiacijų biochemines savybes. Iš pateikto anglies substratų panaudojimo šilumos žemėlapiu matyti, kad pūdymų ir monokultūrų mėginiai yra atskira grupė, išskyrus vieną iš kukurūzų auginimo variantų (MML). Manoma, kad monokultūrų sistema sukuria kitokias aplinkos sąlygas nei pūdymai. Tai nustatė ir kiti tyrėjai, kurie nurodo, kad žemdirbystės sistemos atlieka lemiamą vaidmenį formuojant potencialų funkcinį metabolitų profilį (McDaniel ir Grandy, 2016; Cardoso et al., 2013). Mes pastebėjome, kad pūdymų dirvožemio mėginiai pasižymi mažesniu anglies panaudojimo lygiu ir fermentų aktyvumu (DHA, URE, PROT, PHOSacid ir β -GLC) nei tirti monokultūrų variantai. Venter ir kt. (2016) paaiškino padidėjusių biocheminių savybių monokultūrose poveikį, atsižvelgdami į piktžolių išsigalėjimo įtaką. Monokultūrų sistema yra labiau pažeidžiama dėl piktžolių augimo, kuris dėl augalų liekanų ir šaknų išskyrų didina biologinę įvairovę ir biocheminį potencialą. Apskritai, mūsų rezultatai parodė, kad didžiausias anglies substratų panaudojimo lygis buvo pastebėtas angliavandenių ir polimerų atveju, o tai yra substratai, kuriuos daugiausia naudoja dirvožemio mikroorganizmų populiacijos. Šiuos rezultatus taip pat pateikė kiti tyrėjai (Lan ir kt. 2019, Chinthalapudi ir kt., 2023, Piotrowska ir kt. 2022), kurie aprašo, kad aukštas angliavandenių panaudojimo laipsnis yra būdingas viršutiniam dirvožemio sluoksniui (0–10 cm). Tai susiję su didžiausiu skilimo procesų greičiu ir cukrų buvimu dirvožemyje. Be to, kai kurių amino rūgščių panaudojimas gali būti susijęs su fitohormonų biosinteze ir augalų bei mikrobus komunikacija (Faure et al., 2009). Ypač argininas ir fenilaminas, kurie yra atitinkamai poliaminų ir salicilo rūgšties pirmtakai. Remiantis Biolog rezultatų duomenimis, buvo užfiksuotas didelis L-arginino metabolizmas esant mikrobus bendrijoms. Poliaminai, kurių pirmtakas yra argininas, o tarpinis produktas – putrescinas, randami daugumoje augalų audinių ir yra glaudžiai susiję su augalų reakcija į stresą (Bajguz ir Piotrowska-Niczyporuk, 2023). Mikroorganizmų aktyvumas ir biocheminis potencialas naudoti ir metabolizuoti minėtas amino rūgštis augalų hormonų biosintezės metu nėra labai aiškus mechanizmas esant dabartiniam žinių lygiui; tačiau ryšys su augalų augimu ir atsparumu stresui yra neabejotinas ir turėtų būti tiriamas ateities tyrimuose.

Dirvožemio fermentinis aktyvumas sudaro sąlygas biocheminiams procesams ir katalizuoja organinių liekanų skilimą, maistinių medžiagų apytaką, organinių medžiagų susidarymą, humifikaciją ir mineralizaciją (Wolińska ir Bennicelli, 2010; Wolna-Maruwka ir kt., 2009). Fermentinio aktyvumo matavimai yra dirvožemio kokybės pokyčių efektyvumo rodikliai ir yra jautrūs svyravimams. Statistiškai reikšmingas dirvožemio fermentinio aktyvumo sumažėjimas buvo pastebėtas dirvožemyje po pūdymo, o tai koreliuoja su sumažėjusiu metaboliniu funkcinio įvairumu, nustatytu taikant Biolog metodą. Šis pastebėtas mikroorganizmų biocheminio aktyvumo sumažėjimas dirvožemyje po pūdymo yra, tikėtina, susijęs su sumažėjusiu dirvožemio drėgnumu dėl padidėjusio garavimo ir poveikio dirvožemio temperatūrai (mažėjančiai žiemą ir didėjančiai vasarą) dėl augmenijos nebuvimo (Wang ir kt., 2021). Ankstesni tyrimai parodė, kad dirvožemio fermentų aktyvumo lygis yra susijęs su mikrobus populiacijos struktūra. Atitinkamai, mūsų rezultatai patvirtina, kad didesnis rūgštinės fosfatazės, β -gliukozidazės ir dehidrogenazės lygis monokultūrų bandymuose yra susijęs su Proteobacteria, Chloroflexi, Verrucomicrobiota ir Firmicutes gausa (Acosta-Martínez et al., 2010). Tai įrodo, kad mikrobiologinės įvairovės pokyčiai atlieka lemiamą vaidmenį dirvožemio biocheminiuose procesuose ir yra dirvožemio fermentų šaltinis.

Dirvožemio mikroorganizmų bendrųjų struktūriniai pokyčiai yra susiję su rūšių įvairove ir mikroorganizmų bendrijos stabilumu. Šie pokyčiai paprastai yra matuojami polimorfizmo profiliavimo metodu (pavyzdžiui, t-RFLP technika). Gautas didelis prokariotinių organizmų OTU skaičius dirvožemyje, kuriame auginama monokultūra ir yra laikomas pūdymas, gali būti susijęs su aukštu angliavandenių katabolizmo lygiu (remiantis „Biolog“ ir KEGG rezultatų genų prognozėmis) ir paprastųjų cukrų buvimu, kuris palankus atrinktoms prokariotų grupėms (Berg ir Smalla, 2009). Be to, tai reiškia, kad dirvožemyje yra tam tikrų prokariotinių (bakterijų ir archeonų) grupių, kurios yra atsparios nepalankioms sąlygoms, susijusioms su monokultūra ar dirvonuojančiu lauku, ir yra labai gerai prisitaikiusios. Tačiau buvo išskirti kai kurie ryškūs skirtumai, pavyzdžiui, unikalių fragmentų buvimas ribojimo profilyje, priklausomai nuo augalo (rugiai ar kukurūzai). Kaip teigia Wu ir kt. (2015), šie rezultatai rodo, kad stebimiems individualiems OTU daro įtaką cheminės struktūros įvairovė ir specifinių molekulių, pvz., šaknų eksudatų ar antrinių metabolitų, buvimas, kurie veikia mikrobiomo struktūrą. Tuo pačiu metu bendros genetinės įvairovės sumažėjimas gali atsispindėti kai kurių junginių, turinčių antimikrobinį savybių, buvimu.

Naudotas qPCR metodas leidžia įvertinti funkcinį genų, dalyvaujančių azoto ir anglies apykaitoje, gausumą, reaguojant į dirvožemio savybių ir mikrobiologinės veiklos pokyčius. Dažniausiai tirti azoto ir anglies apykaitos aspektai buvo tręšimo strategijos tipas. Tačiau šiuos procesus taip pat veikia ir žemdirbystės sistema. Mes nustatėme, kad azoto oksidazės reduktazės ir RubisCO genų gausumas buvo žymiai mažesnis dirvožemyje, kuris buvo paliktas pūdymui. Manome, kad pūdymas lemia azoto ir anglies cikluose dalyvaujančių bakterijų gausos sumažėjimą. Atskiri tręšimo strategijų tyrimai parodė, kad tam tikras teigiamas poveikis buvo pastebėtas kukurūzų ir rugių pasėliams, tręštiems NPK, mėšlu ir ankštiniais augalais. Šis pastebėjimas tikriausiai buvo susijęs su kai kurių bakterijų rūšių (*Bacillus*, *Cyanobacteria* ir *Nitrospirales*), kurios klasifikuojamos kaip fakultatyvios chemoautotrofinės arba mixotrofinės bakterijos ir gali katabolizuoti įvairias substratų grupes (Selesi et al., 2005), buvimu. Taip pat buvo nustatyta, kad ne tik bakterijos, bet ir archėjos gali fiksuoti CO₂. Tai atitinka mūsų t-RFLP analizės rezultatus, kurie rodo didelę archėjų grupės įvairovę.

3.2.6. Dirvožemio CO₂ emisijos, temperatūra ir drėgmė

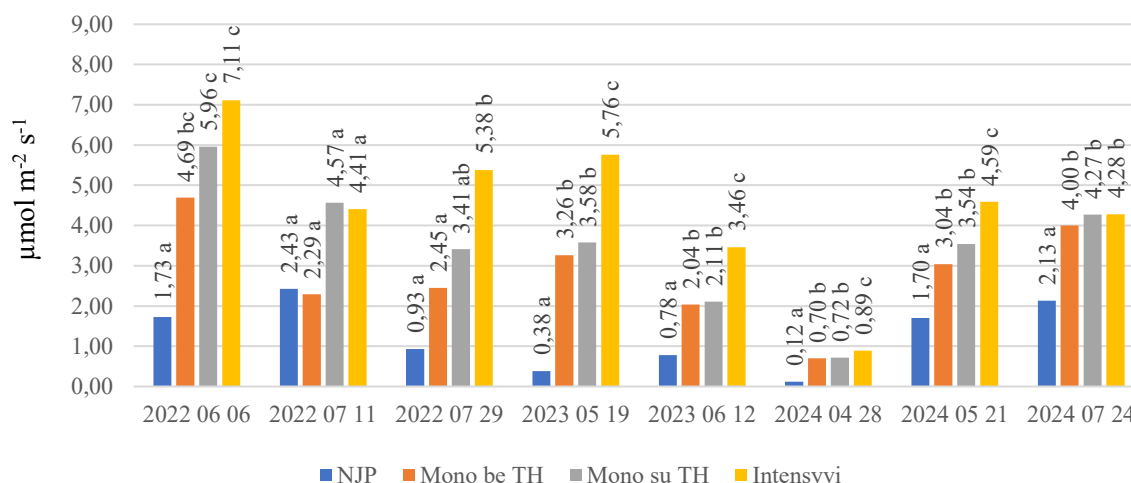
Žieminių rugių vegetacijos pradžioje mažiausias dirvožemio CO₂ emisijos intensyvumas nustatytas nuolatiniam juodajame pūdyme (3.48 pav.). Lyginant su intensyvia sėjomaina ir rugių monopasėliais, CO₂ emisijos iš dirvožemio intensyvumas buvo esmingai mažesnis nuo 63,11 % iki 75,67 %. Tarp intensyvios sėjomainos ir monopasėlių esminių skirtumų nenustatyta, tačiau tendencijos gana ryškios. Intensyvioje sėjomainoje CO₂ emisija iš dirvožemio buvo didesnė 34,04 % lyginant su monopasėliu be trąšų ir herbicidų ir 16,17 % didesnė lyginant su monopasėliu, kuriame naudojamos trąšos ir herbicidai.

Žieminių rugių vegetacijos viduryje atlikus CO₂ emisijų iš dirvožemio matavimus nustatyta, kad didžiausias dujų išsiskyrimas buvo intensyvioje sėjomainoje ir rugių monopasėlyje su trąšomis ir herbicidais, bet skirtumai neesminiai (3.48 pav.). Vegetacijos pabaigoje, prieš derliaus nuėmimą įvertinus CO₂ emisijas iš dirvožemio nustatyti esminiai skirtumai tarp intensyvios sėjomainos ir nuolatinio juodojo pūdymo bei rugių monopasėlio be trąšų ir be herbicidų. Intensyvioje sėjomainoje nustatytas didesnis CO₂ emisijų intensyvumas nuo 36,62 % iki 82,81 % lyginant su monopasėliais ir nuolatinio juodojo pūdymo. Tai lėmė didesnis organinės medžiagos įnašas (tarpiniai pasėliai, mėšlas, daugiametės žolės) intensyvioje sėjomainoje.

Įvertinus augalų intensyvios vegetacijos pradžioje (2023 05 19) CO₂ emisijos išsiskyrimas iš dirvožemio buvo nustatytas mažiausias nuolatiniam juodajame pūdyme ir jis buvo esmingai mažesnis 93,40 proc. lyginant su intensyvia sėjomaina, 88,34 proc. lyginant su monopasėliu, kuriame netaikomas tręšimas ir herbicidai, bei 89,39 proc. lyginant su monopasėliu, kuriame naudojamos trąšos ir herbicidai. Esminių skirtumų nenustatyta tarp monopasėlių, o skirtumas CO₂ emisijos iš dirvožemio nustatytas tik 8,94 proc. Augalų vegetacijos viduryje (2023 06 12) įvertinus CO₂ emisijos išsiskyrimą iš dirvožemio tendencijos išliko tos pačios, t. y., esmingai didžiausias dirvožemio intensyvumas nustatytas intensyvioje sėjomainoje ir jis buvo didesnis 41,04 proc.

lyginant su monopasėliu be trąšų ir be herbicide, 39,02 proc. lyginant su monopasėliu, kuriame naudojamos trąšos ir herbicidai, 77,46 proc. lyginant su nuolatinio juodojo pūdymu.

CO₂ emisija iš dirvožemio

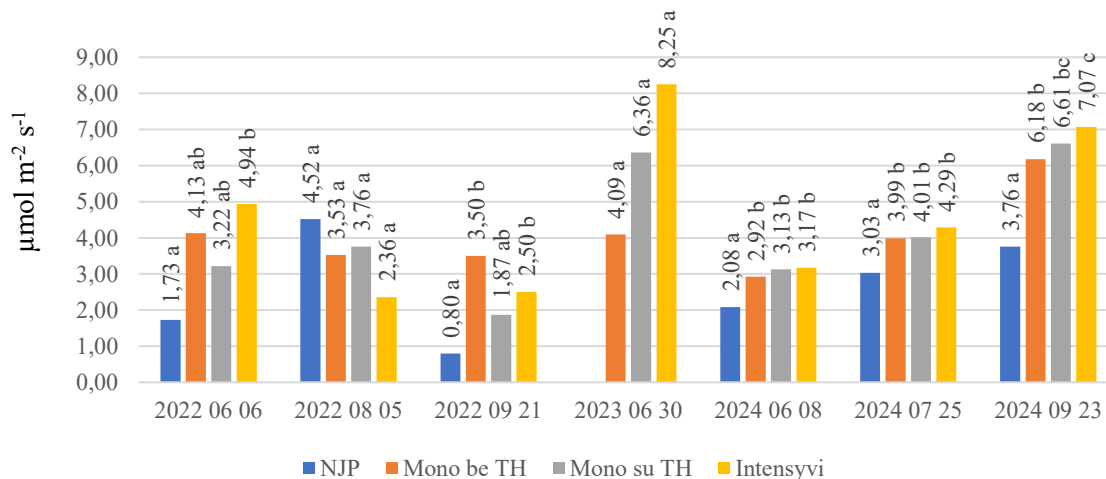


3.48 pav. CO₂ emisija iš dirvožemio žieminių rugių pasėliuose, 2022-2024 m.

Pastaba: ^{a-c} Tarp reikšmių stulpeliuose, pažymėtų skirtingomis raidėmis, nustatyti esminiai skirtumai ($P < 0,05$), NJP – nuolatinis juodasis pūdymas, Mono be TH – monopasėlis be trąšų ir herbicidų (kontrolė), Mono su TH – monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis ir herbicidais, Intensyvi – intensyvi sėjomaina su mineralinėmis ir organinėmis trąšomis bei ankštiniais augalais.

Žieminių rugių vegetacijos pabaigoje nustatyta, kad esminių skirtumų nėra tarp intensyvios sėjomainos ir rugių monopasėlių įvertinus CO₂ emisijos intensyvumą iš dirvožemio. Esminiai skirtumai nuo 46,75 iki 50,23 proc. nustatyti tarp nuolatinio juodojo pūdymo ir visų tirtų žieminių rugių pasėlių. Kukurūzų pasėliuose įvertinus CO₂ emisijas iš dirvožemio jų vegetacijos pradžioje nustatyta, kad tarp intensyvios sėjomainos ir kukurūzų monopasėlių esminių skirtumų nėra (3.49 pav.). Esmingai mažesnis 34,38; 28,77; 33,55 proc. CO₂ emisijos intensyvumas nustatytas juodajame nuolatiniam pūdyme lyginant su intensyvia sėjomaina, monopasėliu be trąšų ir herbicidų bei monopasėliu su trąšomis ir herbicidais atitinkamai.

CO₂ emisija iš dirvožemio



3.49 pav. CO₂ emisija iš dirvožemio kukurūzų pasėliuose, 2022 - 2024 m.

Pastaba: ^{a-c} Tarp reikšmių stulpeliuose, pažymėtų skirtingomis raidėmis, nustatyti esminiai skirtumai ($P < 0,05$). NJP – nuolatinis juodasis pūdymas, Mono be TH – monopasėlis be trąšų ir herbicidų (kontrolė), Mono su TH – monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis ir herbicidais, Intensyvi – intensyvi sėjomaina su mineralinėmis ir organinėmis trąšomis bei ankštiniais augalais.

Kukurūzu vegetācijas pradžioje (2022 06 06) didžiausias CO₂ emisijas intensyvums iš dirvožemio nustatytas intensyvioje sėjomainoje, jis buvo esmingai (64,98 %) didesnis lyginant su nuolatinio juodojo pūdymo. Kukurūzu vegetacijos viduryje (2022 08 05) esminių skirtumų nenustatyta, tačiau nuolatiname juodajame pūdyme stebėtas didžiausias CO₂ emisijas iš dirvožemio išsiskyrimas, o mažiausias – intensyvioje sėjomainoje. Tam įtakos galėjo turėti ir skirtingas dirvožemio drėgmės ir temperatūros santykis. Augalų vegetacijos pabaigoje (2022 09 21) mažiausia CO₂ emisija iš dirvožemio buvo nuolatiname juodajame pūdyme, o intensyvioje sėjomainoje ir kukurūzų monopselyje be herbicidų ir trąšų – esmingai didesnė.

2024 metais įvertinus CO₂ emisiją iš dirvožemio kukurūzų pasėliuose nustatyta, kad didžiausia CO₂ emisija buvo intensyvioje sėjomainoje ir ji buvo didesnė 50,42 proc. lyginant su monopseliu be trąšų ir be herbicidų, bei 22,91 proc. lyginant su monopseliu, kuriame naudojamos trąšos ir herbicidai. Tarp sėjomainos ir monopselių esminių skirtumų nenustatyta (3.50 pav.). Augalų vegetacijos viduryje CO₂ emisijos intensyvumas išliko panašiomis tendencijomis kaip ir augalų vegetacijos pradžioje. Nuolatiname juodajame pūdyme nustatytas esmingai mažesnis CO₂ emisijos intensyvumas iš dirvožemio, kuris buvo mažesnis 29,37 proc. mažesnis lyginant su intensyvioje sėjomainoje auginamu kukurūzų pasėliu. Tarp intensyvioje sėjomainoje auginamų kukurūzų pasėlio ir kukurūzų monopselių esminių skirtumų nenustatyta. Augalų vegetacijos pabaigoje (2024 09 23) didžiausia CO₂ emisija iš dirvožemio nustatyta intensyvioje sėjomainoje ir ji buvo didesnė 12,59 proc. lyginant su kukurūzų monopseliu be trąšų ir be herbicidų. Tarp intensyvios sėjomainos ir monopsėlio, kuriame taikoma tiek trąšos, tiek herbicidai nustatytas 6,51 proc. skirtumas ir jis yra neesminis. Nuolatiname juodajame pūdyme CO₂ emisijos intensyvumas iš dirvožemio nustatytas esmingai mažesnis lyginant tiek su sėjomaina, tiek su kukurūzų monopseliais.

Vertinant dirvožemio temperatūrą CO₂ emisijos iš dirvožemio matavimo metu nustatyta aukščiausia temperatūra nuolatiname juodajame pūdyme ir ji buvo esmingai didesnė 25,86 proc. lyginant su intensyvia sėjomaina, kurioje pasėlio biomasė neleidžia įkaitinti dirvožemio (3.15 lentelė). Tarp monopselių dirvožemio temperatūra skyrėsi 2,65 proc. ir esminių skirtumų nenustatyta. Žieminių rugių pasėliuose dirvožemio drėgmė esmingai buvo didesnė nuo 38,33 iki 45,20 proc., lyginant su nuolatinio juodojo pūdymo.

3.15 lentelė. Dirvožemio drėgmė ir temperatūra žieminių rugių pasėlyje, 2023 m. gegužės 19 d.

Sėjomainos	Dirvožemio temperatūra	Dirvožemio drėgmė
Nuolatinis juodasis pūdydas	18,02 b	7,82 a
Mono be TH	16,52 b	13,73 b
Mono su TH	16,97 b	14,27 b
Intensyvi	13,36 a	12,68 b

Pastaba: ^{a-b} Tarp reikšmių stulpeliuose, pažymėtų skirtingomis raidėmis, nustatyti esminiai skirtumai ($P < 0,05$), Mono be TH – monopselis be trąšų ir herbicidų (kontrolė), Mono su TH – monopselis su mineralinėmis NPK trąšomis ir herbicidais, Intensyvi – intensyvi sėjomaina su mineralinėmis ir organinėmis trąšomis bei ankštiniais augalais.

Augalų vegetacijos viduryje dirvožemio temperatūra nustatyta esmingai mažesnė intensyvioje sėjomainoje: 22,34 proc. lyginant su nuolatinio juodojo pūdymo, 16,41 proc. lyginant su monopseliu, kuriame nenaudojamos trąšos ir herbicidai, 19,38 proc. lyginant su monopseliu, kuriame naudojamos trąšos ir herbicidai (3.16 lentelė).

3.16 lentelė. Dirvožemio drėgmė ir temperatūra rugių pasėlyje, 2023 m. birželio 12 d.

Sėjomainos	Dirvožemio temperatūra	Dirvožemio drėgmė
Nuolatinis juodasis pūdydas	23,68 b	7,23 a
Mono be TH	22,00 b	9,26 b
Mono su TH	22,81 b	8,74 b
Intensyvi	18,39 a	10,21 c

Pastaba: ^{a-b} Tarp reikšmių stulpeliuose, pažymėtų skirtingomis raidėmis, nustatyti esminiai skirtumai ($P < 0,05$), Mono be TH – monopselis be trąšų ir herbicidų (kontrolė), Mono su TH – monopselis su mineralinėmis NPK trąšomis ir herbicidais, Intensyvi – intensyvi sėjomaina su mineralinėmis ir organinėmis trąšomis bei ankštiniais augalais.

Dirvožemio drėgmės rodikliai nustatyti proporcingai dirvožemio temperatūros rodikliams. Esmingai didžiausia dirvožemio drėgmė nustatyta intensyvioje sėjomainoje ir ji buvo didesnė 29,19 proc. lyginant su nuolatinio juodojo pūdymu. Tarp žieminių rugių monopselio be trąšų ir be taikomų herbicidų ir tarp monopselio su taikomomis trąšomis ir herbicidais esminių skirtumų nenustatyta. Įvertinus dirvožemio temperatūrą ir drėgmę kukurūzų pasėliuose (2023 06 30) esminių skirtumų nenustatyta (3.17 lentelė).

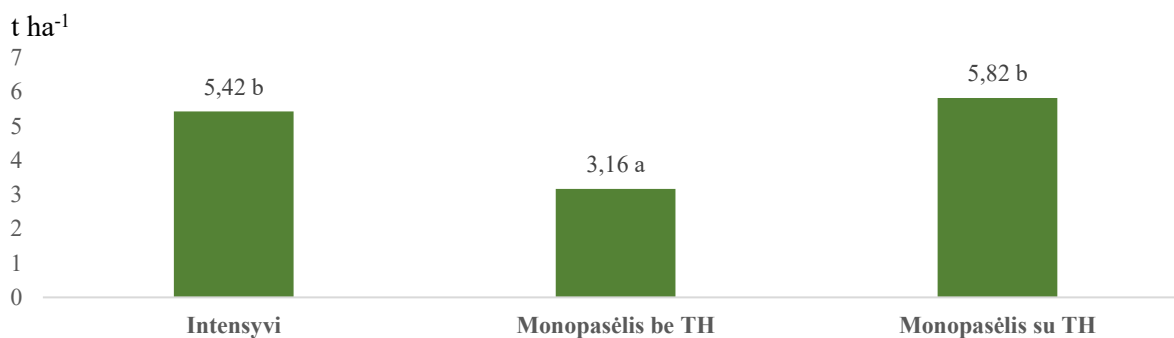
3.17 lentelė. Dirvožemio drėgmė ir temperatūra kukurūzų pasėliuose, 2023 m. birželio 30 d.

Sėjomainos	Dirvožemio temperatūra	Dirvožemio drėgmė
Monopselis be TH	21,67 a	23,55 a
Monopselis su TH	22,59 a	24,52 a
Intensyvi	21,94 a	23,93 a

Pastaba: Tarp reikšmių stulpeliuose, pažymėtų ta pačia raide, esminių skirtumų nenustatyta ($P > 0,05$), Mono be TH – monopselis be trąšų ir herbicidų (kontrolė), Mono su TH – monopselis su mineralinėmis NPK trąšomis ir herbicidais, Intensyvi – intensyvi sėjomaina su mineralinėmis ir organinėmis trąšomis bei ankštiniais augalais.

3.2.7. Augalų produktyvumas ir derlingumas

Žieminių rugių derlingumas buvo vertintas toje pačioje vietoje 55 metus auginamuose rugių monopseliuose ir intensyvioje sėjomainoje. Mažiausias žieminių rugių derlingumas nustatytas be trąšų ir be herbicidų auginamame rugių monopselyje (3.50 pav.).



3.50 pav. Žieminių rugių derlingumas 2022 m.

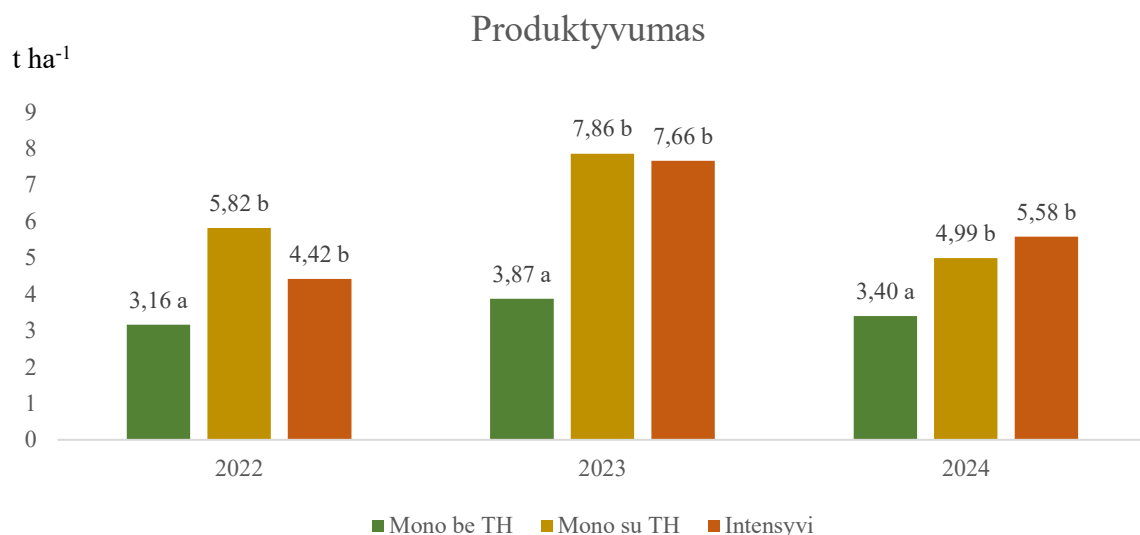
Pastaba: ^{a-b} Tarp reikšmių stulpeliuose, pažymėtų skirtingomis raidėmis, nustatyti esminiai skirtumai ($P < 0,05$), T – trąšos, H – herbicidai.

Rugių, auginamų intensyvioje sėjomainoje ir monopselyje su trąšomis ir herbicidais, derlingumas buvo atitinkamai 71,5 ir 84,2 % didesnis. Žieminių rugių derlingumas intensyvioje sėjomainoje su dideliu organinės medžiagos įnašu buvo panašus kaip 55 metus nuolatos auginamų monopselyje su trąšomis ir herbicidais. Šie rezultatai patvirtina teiginį, kad žieminiai rugiai yra vieni labiausiai monopselį pakenčiančių augalų Lietuvoje. Tuo pačiu aiškėja, kad jie yra mažiau jautrūs organikos įnašo pokyčiams, nereiklūs augalai.

Įvertinus žieminių rugių produktyvumą nustatyta (3.51 pav.), kad esmingai mažesnis derlius buvo rugių monopselyje be trąšų ir be herbicidų, 49,48 proc. mažesnis už rugių derlių intensyvioje sėjomainoje ir 50,76 proc. mažesnis už rugių derlių monopselyje, kuriame naudojamos ir trąšos, ir herbicidai.

Tarp intensyvios sėjomainos ir rugių monopselio su trąšomis ir herbicidais derliaus skirtumas nustatytas 2,54 proc., o esminiai skirtumai nenustatyti.

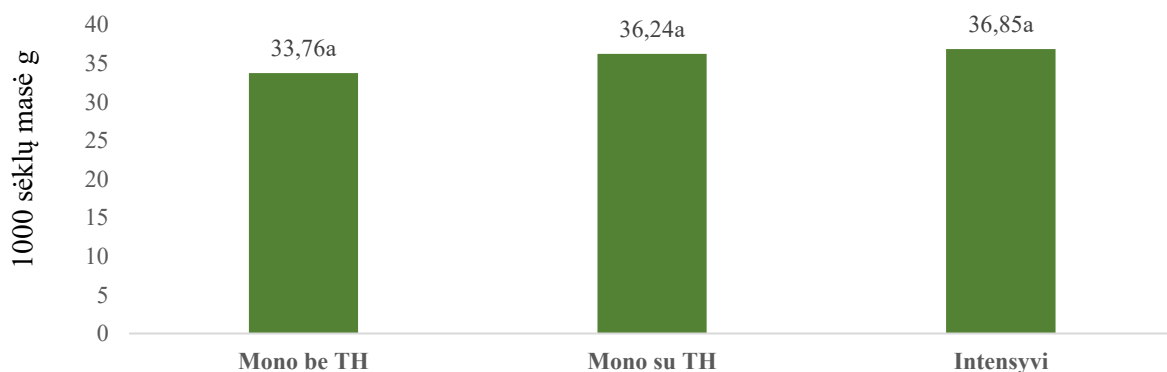
Žieminių rugių 2024 metais produktyvumo tendencijos išliko tokios pačios. Esmingai mažesnis produktyvumas nustatytas monopselyje be trąšų ir be herbicidų ir jis buvo mažesnis 39,07 proc. lyginant su intensyvia sėjomaina ir 31,86 proc. lyginant su monopseliu su trąšomis ir herbicidais.



3.51 pav. Žieminių rugių produktyvumas, 2022, 2023, 2024 m.

Pastaba: Tarp reikšmių stulpeliuose, pažymėtų ne tomis pačiomis raidėmis, yra esminiai skirtumai ($P < 0,05$). Mono be TH – monopasėlis be trąšų ir herbicidų (kontrolė), Mono su TH – monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis ir herbicidais, Intensyvi – intensyvi sėjomaina su mineralinėmis ir organinėmis trąšomis bei ankštiniais augalais.

Nors žieminių rugių 1000 sėklų masės esminių skirtumų nenustatyta, tačiau pastebėta tendencija, kad intensyvioje sėjomainoje šis rodiklis buvo didesnis 1,66 % - 8,39 % lyginant su monopasėliais (3.52 pav.).



3.52 pav. Žieminių rugių 1000 sėklų masė 2022 m

Pastaba: Tarp reikšmių stulpeliuose, pažymėtų ta pačia raide, esminių skirtumų nenustatyta ($P < 0,05$), Mono be TH – monopasėlis be trąšų ir herbicidų (kontrolė), Mono su TH – monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis ir herbicidais, Intensyvi – intensyvi sėjomaina su mineralinėmis ir organinėmis trąšomis bei ankštiniais augalais.

2023 m. įvertinus žieminių rugių pasėlių biometrinius rodiklius nustatyta, kad produktyvių varpų skaičius esmingai mažesnis buvo monopasėlyje be trąšų ir be herbicidų ir jis buvo mažesnis 29,21 proc. lyginant su intensyvia sėjomaina ir 35,98 proc. lyginant su monopasėliu su trąšomis ir herbicidais (3.18 lentelė).

Augalų antžeminė masė esmingai mažiausia nustatyta monopasėlyje be trąšų ir herbicidų lyginant su intensyvia sėjomaina – 40,36 proc. ir monopasėliu su trąšomis ir herbicidais – 49,44 proc. Ta pati tendencija išlieka įvertinus produktyvių varpų masę, t. y., monopasėlyje su trąšomis ir herbicidais produktyvių varpų masė buvo esmingai 49,93 proc. lyginant su monopasėliu be trąšų ir be herbicidų.

Šiaudų masė didžiausia nustatyta monopasėlyje su trąšomis ir herbicidais ir jis buvo esmingai didesnis 48,75 proc. lyginant su monopasėliu be trąšų ir herbicidų. Intensyvioje sėjomainoje šiaudų masė užauginta mažesnė 6,91 proc. lyginant su monopasėliu su trąšomis ir herbicidais, esminių skirtumų nenustatyta.

Stiebų aukštis didžiausias nustatytas intensyvioje sėjomainoje ir jis buvo esmingai didesnis 16,69 proc. lyginant su monopasėliu be trąšų ir herbicidų, Tarp monopasėlių esminių skirtumų

nenustatyta, bet monopsėlyje su trąšomis ir herbicidais vidutinis stiebų aukštis buvo didesnis 5,24 proc. lyginant su monopsėliu be trąšų ir herbicidų.

3.18 lentelė. Žieminių rugių pasėlio tankumas, biometriniai ir derliaus struktūros rodikliai, 2023 m.

Rodikliai	Sėjomainos		
	Monopsėlis be TH	Monopsėlis su TH	Intensyvi
Produktyvių varpų skaičius, vnt. m ⁻²	315 a	492 b	445 b
Augalų antžeminės dalies masė, g m ⁻²	1027,4 a	2032,2 b	1722,7 ab
Produktyvių varpų masė, g m ⁻²	596,6 a	1191,5 b	940,2 ab
Šiaudų masė, g m ⁻²	430,8 a	840,6 b	782,5 ab
Vidutinis stiebų aukštis, cm	104,8 a	110,6 a	125,8 b
Vidutinis varpos ilgis, cm	7,48 a	8,60 a	8,54 a
Vidutinis grūdų skaičius varpoje, vnt.	41,7 a	49,6 a	49,9 a
Vidutinė varpos grūdų masė, g	1,58 a	2,01 a	1,74 a
Grūdų masė, g m ⁻²	497,0 a	988,3 b	780,7 ab
1000 grūdų masė, g	36,2 a	39,4 a	33,8 a

Pastaba: Tarp reikšmių stulpeliuose, pažymėtų ne tomis pačiomis raidėmis, yra esminiai skirtumai ($P < 0,05$). Mono be TH – monopsėlis be trąšų ir herbicidų (kontrolė), Mono su TH – monopsėlis su mineralinėmis NPK trąšomis ir herbicidais, Intensyvi – intensyvi sėjomaina su mineralinėmis ir organinėmis trąšomis bei ankštiniais augalais.

Įvertinus vidutinį varpų ilgį tarp tiriamų variantų esminių skirtumų nenustatyta. Tarp intensyvios sėjomainos ir monopsėlio su trąšomis ir herbicidais vidutinis varpos ilgis skiriasi 0,70 proc., o tarp monopsėlių – 13,02 proc.

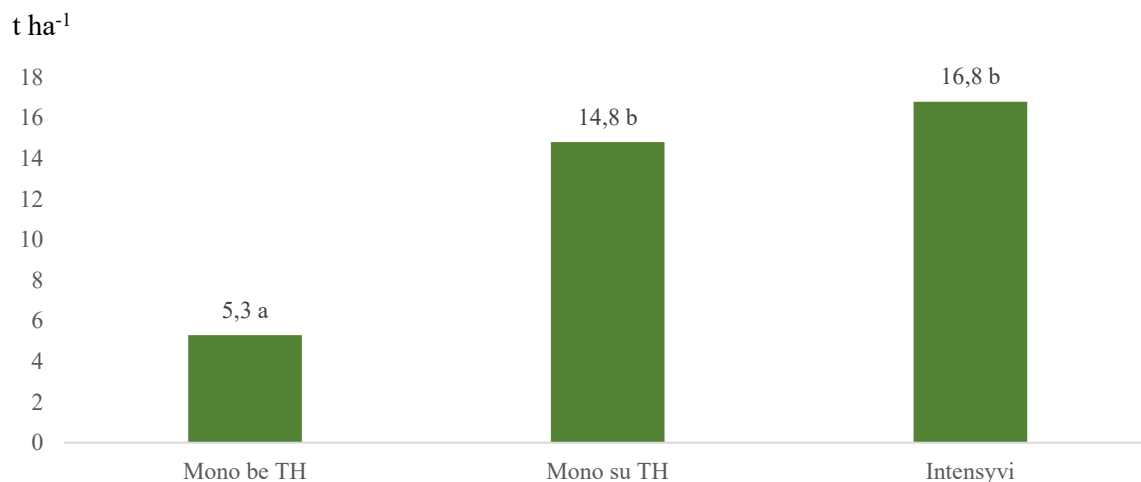
Vidutinis grūdų skaičius varpoje didžiausias nustatytas intensyvioje sėjomainoje, bet jis buvo didesnis tik 0,60 proc. lyginant su monopsėliu su trąšomis ir herbicidais. Tarp monopsėlių vidutinis grūdų skaičius varpoje buvo 15,73 proc. mažesnis monopsėlyje be trąšų ir be herbicidų. Tarp tiriamų variantų esminių skirtumų nenustatyta.

Vidutinė grūdų masė varpoje didžiausia monopsėlyje su trąšomis ir herbicidais, ir ji buvo didesnė 13,43 proc. lyginant su intensyvia sėjomaina, o 21,39 proc. didesnė lyginant su monopsėliu be trąšų ir be herbicidų. Esminių skirtumų nenustatyta.

Esmingai 9,71 proc. didesnė grūdų masė nustatyta monopsėlyje su trąšomis ir herbicidais lyginant su monopsėliu be trąšų ir be herbicidų. Tarp intensyvios sėjomainos ir monopsėlio su trąšomis ir herbicidais esminių skirtumų nenustatyta, bet intensyvioje sėjomainoje grūdų masė iš m² buvo mažesnė 21,01 proc. lyginant su monopsėliu su trąšomis ir herbicidais.

Tarp tiriamų variantų įvertinus 1000 grūdų masę – esminių skirtumų nenustatyta. Monopsėlyje su trąšomis ir herbicidais 1000 grūdų masė buvo didesnė 8,12 proc. lyginant su monopsėliu be trąšų ir be herbicidų, bei 14,21 proc. mažesnė lyginant su intensyvia sėjomaina.

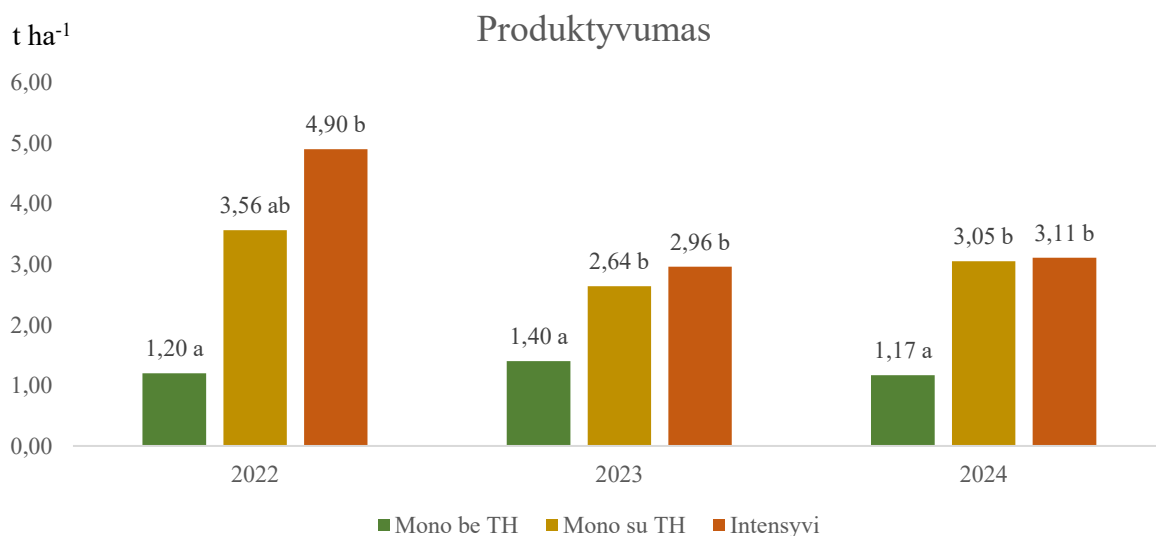
Nustatyta, kad monopsėlio su trąšomis ir herbicidais burbuolių žalioji biomasa buvo 2,8 karto didesnė nei monopsėlio be herbicidų ir be mineralinių trąšų (3.53 pav.). Intensyvioje sėjomainoje su dideliu organinės medžiagos įnašu kukurūzų burbuolių žalioji biomasa buvo dar 13,5 % didesnė nei monopsėlyje su herbicidais ir mineralinėmis trąšomis.



3.53 pav. Kukurūzų burbuolių žalioji biomasė 2022 m.

Pastaba: ^{a-b} Tarp reikšmių stulpeliuose, pažymėtų skirtingomis raidėmis, nustatyti esminiai skirtumai ($P < 0,05$), Mono be TH – monopasėlis be trąšų ir herbicidų (kontrolė), Mono su TH – monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis ir herbicidais, Intensyvi – intensyvi sėjomaina su mineralinėmis ir organinėmis trąšomis bei ankštiniais augalais.

Kukurūzų bendrosios žaliosios biomasės derlingumo skirtumai rodo, kad šis augalas labai reaguoja tiek į tręšimą mineralinėmis, tiek ir organinėmis trąšomis. Tarp tiriamų variantų nustatyti esminiai skirtumai (3.54 pav.). Monopasėlio su trąšomis ir herbicidais derlingumas buvo 3,0 karto didesnis nei monopasėlio be herbicidų ir be mineralinių trąšų. Intensyvioje sėjomainoje su dideliu organinės medžiagos įnašu kukurūzų bendrosios žaliosios biomasės derlingumas buvo dar 39,8 % didesnis nei monopasėlyje su herbicidais ir mineralinėmis trąšomis.



3.54 pav. Kukurūzų produktyvumas, 2022 - 2024 m.

Pastaba: ^{a-b} Tarp reikšmių stulpeliuose, pažymėtų skirtingomis raidėmis, nustatyti esminiai skirtumai ($P < 0,05$), Mono be TH – monopasėlis be trąšų ir herbicidų (kontrolė), Mono su TH – monopasėlis su mineralinėmis NPK trąšomis ir herbicidais, Intensyvi – intensyvi sėjomaina su mineralinėmis ir organinėmis trąšomis bei ankštiniais augalais.

2024 m. įvertinus kukurūzų derlių nustatyta, kad vyravo panašios tendencijos kaip ir prieš tai dvejus metus. Esmingai mažesnis derlius nustatytas monopasėlyje be trąšų ir be herbicidų ir jis buvo mažesnis 62,38 proc. lyginant su intensyvia sėjomaina, bei 61,64 proc lyginant su monopasėliu su trąšomis ir herbicidais.

Kukurūzų burbuolių svoris nustatytas didžiausias intensyvioje sėjomainoje ir jis esmingai didesnis 56,98 proc. lyginant su monopasėliu be trąšų ir herbicidų ir esmingai didesnis 17,44 proc. už monopasėlyje su trąšomis ir herbicidais užaugintų burbuolių svoriu (3.19 lentelė).

Esminių skirtumų nenustatyta įvertinus burbuolių skaičių skirtinguose monosėliuose ir intensyvioje sėjomainoje. Intensyvioje ir monosėlyje be trąšų ir herbicidų burbuolių skaičius skyrėsi tik 3,52 proc., o monosėlyje su trąšomis ir herbicidais užauginta 17,13 proc. daugiau lyginant su intensyvioje sėjomainoje užaugintu burbuolių skaičiumi.

Didesnį burbuolių skaičių monosėlyje su trąšomis ir herbicidais galėjo lemti ir tankesnis pasėlis. Monosėlyje su trąšomis ir herbicidais nustatytas esmingai didesnis 19,42 proc. augalų skaičius lyginant su intensyvia sėjomaina ir monosėliu be trąšų ir be herbicidų. Intensyvioje sėjomainoje ir monosėlyje be trąšų ir herbicide nustatytas vienodas augalų skaičius kvadratiname metre.

Augalų antžeminė masė esmingai mažesnė buvo užauginta monosėlyje be trąšų ir be herbicidų ir ji buvo mažesnė 46,77 proc. už intensyvioje sėjomainoje užaugintą kukurūzų antžeminę masę ir 45,90 proc. mažesnė lyginant su monosėliu, kuriame naudojamos trąšos ir herbicidai.

Nustatyta, kad aukščiausi kukurūzai buvo intensyvioje sėjomainoje ir jų aukštis buvo esmingai didesnis 18,06 proc. lyginant su monosėliu su trąšomis ir herbicidais ir esmingai didesnis 54,63 proc. lyginant su monosėliu be trąšų ir be herbicide. Lyginant monosėlius nustatytas esmingas skirtumas tarp augalų aukščių ir monosėlis be trąšų ir be herbicidų buvo esmingai mažesnis 44,62 proc. lyginant su monosėliu su trąšomis ir herbicidais.

3.19 lentelė. Kukurūzų pasėlio tankumas, biometriniai ir derliaus struktūros rodikliai, 2023-2024 m.

Rodikliai	Sėjomainos					
	Monosėlis be TH		Monosėlis su TH		Intensyvi	
	2023	2024	2023	2024	2023	2024
Burbuolių svoris, g m ⁻²	740 a	513 a	1420 b	1467 b	1720 c	1513 b
Augalų antžeminės dalies masė, g m ⁻²	660 a	660 a	1220 b	1586 b	1240 b	1600 b
Burbuolių skaičius vnt. m ⁻²	9,33 a	8,33 a	11,67 a	9,66 ab	9,67 a	10,30 b
Augalų skaičius, vnt. m ⁻²	9,67 a	8,66 a	12,0 b	9,66 b	9,67 a	10,00 b
Vidutinis stiebų aukštis, cm	103 a	85 a	186 b	142 b	227 c	156 c
Sausųjų medžiagų kiekis, %	52,97 b	48,46 a	49,73 a	52,80 b	47,80 a	54,20 b

Pastaba: Tarp reikšmių stulpeliuose, pažymėtų ne tomis pačiomis raidėmis, yra esminiai skirtumai ($P < 0,05$). Mono be TH – monosėlis be trąšų ir herbicidų (kontrolė), Mono su TH – monosėlis su mineralinėmis NPK trąšomis ir herbicidais, Intensyvi – intensyvi sėjomaina su mineralinėmis ir organinėmis trąšomis bei ankštiniais augalais.

Įvertinus kukurūzų sausąsias medžiagas nustatyta, kad esmingai daugiau 9,76 proc. buvo monosėlyje be trąšų ir be herbicidų lyginant su intensyvioje sėjomainoje kukurūzų sausosiomis medžiagomis ir 6,12 proc. esmingai daugiau už monosėlio su trąšomis ir herbicidais.

Sėjomainose, kuriuose buvo užauginta didžiausia kukurūzų antžeminė masė sausųjų medžiagų kiekis nustatytas proporcingai mažiausias,

IŠVADOS

Remiantis nuo 1967 ir 2000 m. vykdomuose dviejuose stacionariuose lauko eksperimentuose gautais rezultatais ir pokyčiais, kurie ilgainiui susikaupė ir išryškėjo dėl skirtingų dirvožemio naudojimo ir kokybės valdymo praktikų, galima teigti šias išvadas:

1. Po gilaus arimo CO₂ emisija iš dirvos paviršiaus esmingai didesnė nei nederbtoje dirvoje su tarpiniais pasėliais ar be jų. To priežastis - didesnis dirvožemio aeravimas ir organinės medžiagos irimas tuoj po arimo. Tačiau po arimo praėjus 1,5-2 mėnesiams CO₂ emisijos esminių skirtumų nebenustatyta nes dirva susiguli ir sumažėja aeracija bei organinės medžiagos ardymas. Vėliau, augant augalams jų šaknų sistema ir mikrobiologiniai procesai tampa pagrindiniais CO₂ emisijų reguliatoriais ir dėsningo žemės dirbimo technologijų bei šiaudų grąžinimo į dirvą poveikio nepavyksta išvelgti. Gilaus arimo pakeitimas augalų auginimu nederbant žemės (t. y. tiesiogine sėja) su tarpiniais pasėliais ar be jų leidžia sumažinti CO₂ emisijas 1,5-2 mėnesius, tuo pačiu ir neigiamą ūkininkavimo poveikį klimato kaitai.
2. Technologija be žemės dirbimo, ypač derinama su tarpiniais pasėliais, didina dirvožemio organinės anglies kiekį, todėl didėja anglies sekvestracija ir gerėja dirvožemio sveikata. Taip pat labai padidėja humino frakcija, kuri laikoma ypač stabiliomis ir ilgalaikėmis atmosferos anglies sanaujomis. Ši ūkininkavimo praktika pagerina huminių ir fulvo rūgščių frakcijų kaupimąsi dirvožemyje, o tai gerina organinės medžiagos kokybę ir dirvožemio sveikatą.
3. Ilgalaikis technologijos be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais ar be jų taikymas esmingai didina dirvožemio fermentų sacharazės (nuo 1,1 iki 1,9 karto) bei ureazės (nuo 2,5 iki 3,6 karto) aktyvumą 0-10 cm armens sluoksnyje, palyginti su giliu arimu be ir su šiaudais. Fermentų sacharazės ir ureazės aktyvumas 10-20 cm armens sluoksnyje skirtingai dirbtuose laukeliuose esmingai nesiskyrė.
4. Ilgalaikis (nuo 2000 m.) technologijos be žemės dirbimo su tarpiniais pasėliais ar be jų taikymas 2022 m. klimatinėmis sąlygomis esmingai padidino žieminių rapsų derlingumą, o 2023 m. - žieminių kviečių derlingumą, o 2024 m. nustatyta vasarinių miežių derlingumo didėjimo tendencija. Palyginus su įprastu žemės dirbimu – arimu – žieminių rapsų derlingumas buvo didesnis atitinkamai 35 ir 53 %, žieminių kviečių – 19 ir 12 %, o vasarinių miežių – 9 ir 15 %. Technologijos be žemės dirbimo, ypač derinamos su tarpinių pasėlių auginimu ir augalų liekanų (šiaudų) panaudojimu, palyginti su įprastiniu arimu, po tam tikro pereinamojo laikotarpio užtikrina didesnę produktyvumo potencialą ir reikšmingai prisideda prie žemės ūkio tvarumo.
5. Monopasėlyje be trąšų ir be herbicidų auginamų žieminių rugių derlingumas mažiausias. Rugių, auginamų intensyvioje sėjomainoje ir monopasėlyje su trąšomis ir herbicidais, derlingumas buvo atitinkamai 71,5 ir 84,2 % didesnis 2022 metais. Įvertinus žieminių rugių produktyvumą 2023 m. nustatyta, kad esmingai mažesnis derlius buvo rugių monopasėlyje be trąšų ir be herbicidų, 49,48 % mažesnis už rugių derlių intensyvioje sėjomainoje ir 50,76 % mažesnis už rugių derlių monopasėlyje, kuriame naudojamos ir trąšos, ir herbicidai. 2024 metais žieminių rugių produktyvumo tendencijos išliko tokios pačios kaip 2023-2024 m. – esmingai mažesnis produktyvumas nustatytas monopasėlyje be trąšų ir be herbicidų ir jis buvo mažesnis 39,07 %, lyginant su intensyvia sėjomaina ir 31,86 %, lyginant su monopasėliu su trąšomis ir herbicidais. Žieminių rugių derlingumas intensyvioje sėjomainoje su dideliu organinės medžiagos įnašu buvo panašus kaip 56 metus nuolatos auginamų monopasėlyje su trąšomis ir herbicidais. Žieminiai rugiai yra ne tik vieni labiausiai monopasėlių pakenčiančių augalų Lietuvoje, bet yra ir mažiau jautrūs organikos įnašo pokyčiams, t. y. nereiklūs augalai.
6. Kukurūzų bendrosios žaliosios biomasės derlingumo skirtumai rodo, kad šis augalas labai reaguoja tiek į tręšimą mineralinėmis, tiek ir organinėmis trąšomis. Tarp tiriamų variantų nustatyti esminiai skirtumai. Monopasėlio su trąšomis ir herbicidais derlingumas buvo 3,0 karto didesnis 2022 m. ir 1,89 karto didesnis 2023 m. nei monopasėlio be herbicidų ir be mineralinių trąšų. Intensyvioje sėjomainoje su dideliu organinės medžiagos įnašu kukurūzų bendrosios žaliosios biomasės derlingumas 2022 metais buvo dar 39,8 % didesnis nei monopasėlyje su herbicidais ir mineralinėmis trąšomis, o 2023 metais nustatytas produktyvumas didesnis 10,81

% lyginant su monopsėliu su trąšomis ir herbicidais. 2024 m. kukurūzų derlingumo rodikliai išliko panašūs – esmingai mažesnis derlius nustatytas monopsėlyje be trąšų ir be herbicidų ir jis buvo mažesnis 62,38 % lyginant su intensyvia sėjomaina, bei 61,64 % lyginant su monopsėliu su trąšomis ir su herbicidais.

7. Rezultatai patvirtino teigiamą ilgalaikio organinio tręšimo poveikį anglies sekvestracijai, ypač lyginant su nuolatinio juodojo pūdymu. Tačiau šis poveikis labai priklauso nuo auginamo augalo. Naudingiausi pokyčiai buvo nustatyti auginant kukurūzus intensyvioje sėjomainoje dėl tręšimo mėšlo ir ankštinių augalų poveikio. Šie pokyčiai nebuvo lydimi humino – atspariausios mikroorganizmų ardymui dirvožemio organinės medžiagos frakcijos - dalies huminėse medžiagose padidėjimo.
8. Intensyvi sėjomaina, palyginti su nuolatinio juodojo pūdymu ir rugių bei kukurūzų monopsėliais, yra naudingiausia praktika vandentalpos, dirvožemio struktūros patvarumo ir anglies sekvestracijos gerinimui. Ženklus bendrosios organinės anglies padidėjimas intensyvioje sėjomainoje lėmė ir huminių ir fulvo rūgščių kiekio padidėjimą. Humino kiekis dirvožemiuose, tiek taikant intensyvią sėjomainą, tiek ir monopsėliuose, buvo didesnis nei nuolatiname juodajame pūdyme. Tačiau, taikant intensyvią sėjomainą, humino struktūra dirvožemyje rodė mažiau pažengusią humifikacijos procesą, nes dėl nuolatinio šviežių organinių liekanų tiekimo, jos humifikuojasi tik praėjus tam tikram laikui. Todėl huminas, susidarantis dirvožemyje, kuriame taikoma intensyvi sėjomaina, pasižymi labiau alifatinės struktūros (kaip žaliavos įvairiems organiniams junginiams sintetinti) savybėmis nei huminas, susidarantis dirvožemyje, kuriame taikomas nuolatinis juodasis pūdymas. Huminas netręšiamose monopsėliuose, ypač rugiuose, pasižymi panašiu aromatiškumu kaip ir pūdymas, o tai rodo didesnę „senos“, gerai transformuotos huminės medžiagos dalį. Šie rezultatai padeda geriau suprasti, kaip agroekosistemos veikia dirvožemio aplinką, įskaitant dirvožemio organinės medžiagos kaupimą ir stabilizavimą. Patvirtinta, kad ankštinių augalų, organinių trąšų ir pasėlių įvairovės integravimas yra labai svarbus ilgalaikiam dirvožemio sveikumui ir atsparumui klimato keliama stresui užtikrinti.
9. Labiausiai matomi huminų UV-Vis ir fluorescencinių savybių pokyčiai atsirado intensyvioje sėjomainoje dėl mėšlo ir ankštinių augalų naudojimo. Tai rodo, kad tokia praktika skatina tvaresnius dirvožemio organinės medžiagos humifikacijos procesus, prisidedančius prie sudėtingesnės struktūros – humino – frakcijos susidarymo. Kita vertus, humino fluorescencijos spektrai yra daugelio skirtingų rūšių fluoroforų sąveikos rezultatas, kurių indėlį sunku tiksliai nustatyti ir interpretuoti. Norint išsamiai išaiškinti šias savybes, reikalingi tolesni tyrimai, paremti kitais metodais.
10. Mikroorganizmų bendrijų struktūros sudėtis ir aktyvumas labai skyrėsi tarp monopsėlio ir nuolatinio juodojo pūdymo dirvožemyje. Riboti skirtumai nustatyti reaguojant į tręšimo strategijas. Žemiausias mikrobiologinių parametrų lygis, įskaitant biocheminį ir fermentinį aktyvumą, prokariotų bendrijų įvairovę ir funkcinių genų kiekybinį įvertinimą, buvo nustatytas taikant nuolatinį juodąjį pūdymą. Grybų gausos didėjimas ir bakterijų gausos mažėjimas monopsėlių dirvožemiuose, rodo patogenų kaupimosi riziką, mažėjant potencialiai naudingų štamų skaičiui. Monopsėliai ir juodasis pūdymas nėra tinkamos agrotechninės ir dirvožemio kokybės valdymo praktikos.
11. Žieminių rugių agrocenozeje kasmet įnešant į dirvožemį organinės medžiagos ir taikant agrotechnines priemones dirvožemio fermento sacharazės aktyvumas nustatytas esmingai nuo 2,7 iki 6,2 karto, o fermento ureazės aktyvumas esmingai nuo 10 iki 110 karto didesnis negu juodojo pūdymo dirvožemyje. 2024 m. intensyvioje sėjomainoje fermento ureazės aktyvumas nustatytas esmingai 77,4 % didesnis negu monopsėlyje be trąšų ir herbicidų. Kukurūzus auginant monopsėlyje bei intensyvioje sėjomainoje po pavasarį žaliajai trąšai įterptų tarpinių pasėlių fermento sacharazės aktyvumas nustatytas esmingai nuo 2,0 iki 5,5 karto, o fermento ureazės aktyvumas esmingai nuo 2,0 iki 113 karto didesnis negu juodojo pūdymo dirvožemyje. Kukurūzus auginant intensyvioje sėjomainoje fermento sacharazės aktyvumas dirvožemyje nustatytas esmingai 1,4 ir 2,7 karto, o fermento ureazės aktyvumas esmingai 2,3 ir 48,6 karto didesnis negu monopsėliuose.

Remiantis nuo 1967 ir 2000 m. vykdomuose dviejuose stacionariuose lauko eksperimentuose gautais rezultatais ir pokyčiais, kurie ilgai susikaupė ir išryškėjo dėl skirtingų dirvožemio naudojimo ir kokybės valdymo praktikų, galima teigti šias mokslškai pagrįstas praktines rekomendacijas, orientuotas į tvarių ūkininkavimą, dirvožemio sveikatą ir derlingumo stabilumą.

1. Žemės dirbimo technologijos pasirinkimas

Rekomenduojama mažinti žemės dirbimo intensyvumą ir esant galimybėms pereiti prie tiesioginės sėjos be žemės dirbimo (*no-till*) arba minimalios žemės dirbimo technologijos. Po gilaus arimo trumpalaikė (1,5–2 mėn.) CO₂ emisija iš dirvožemio yra reikšmingai didesnė, todėl minimalios žemės dirbimo technologijos leidžia sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) emisijas, išsaugoti organinę anglį dirvožemyje taip didinant jo produktyvumą ir mažinti ūkininkavimo neigiamą poveikį klimato kaitai.

2. Tarpiniai pasėliai – dirvožemio anglies sekvestracijos didinimui

Tarpiniai pasėliai (ypač ankštiniai) didina dirvožemio organinės anglies kiekį ir humuso kokybę. Tokia praktika skatina ilgalaikį humino frakcijų kaupimąsi, kurios yra stabilios (ilgalaikės) anglies sandėliai. Tarpinių pasėlių naudojimas kartu su tiesioginės sėjos be žemės dirbimo (*no-till*) ar minimalaus žemės dirbimo technologijomis esmingai gerina dirvožemio fermentų aktyvumą, ypač 0-10 cm armens sluoksnyje, dirvožemio struktūrą ir vandens sulaikymą. Palyginti su įprastiniu arimu, šios technologijos, ypač derinamos su tarpinių pasėlių auginimu ir augalų liekanų (šiaudų) panaudojimu, po tam tikro pereinamojo laikotarpio užtikrina didesnę produktyvumo potencialą ir reikšmingai prisideda prie žemės ūkio tvarumo.

3. Sėjomainos reikšmė ir monopasėlių ribojimas

Monopasėlių (pvz., rugių ar kukurūzų) auginimas be trąšų ir herbicidų reikšmingai (iki 60 % ir daugiau) mažina žemės ūkio augalų derlingumą. Monopasėliai ir juodasis pūdydas nėra tinkamos agrotechninės ir dirvožemio kokybės valdymo praktikos dėl patogenų kaupimosi rizikos ir potencialiai naudingos mikrobiotos štamų skaičiaus mažėjimo. Pasėlių įvairovės, ankštinių augalų ir tarpinių pasėlių integravimas į sėjomainas didina žemės ūkio augalų produktyvumą ir dirvožemio biologinį aktyvumą.

4. Dirvožemio organinės medžiagos kokybės gerinimas

Nuolatinis gausus organinės medžiagos su įvairu C ir N santykiu įnešimas į dirvožemį (daugiametės žolės, tarpiniai pasėliai ir ankštiniai augalai, tręšimas mėšlu, šiaudai ir kitos augalinės liekanos) keičia huminių medžiagų savybes – susidaro sudėtingesnės humino struktūros, kurios yra atsparesnės skaidymui ir lemia ilgalaikę anglies sekvestraciją, dirvožemio organinės medžiagos kaupimą ir stabilizavimą. Tai yra investicija į dirvožemio sveikatą, derlingumo stabilumą, tvarų ūkininkavimą, atsparumo klimato stresui didinimą.

APIBENDRINIMAS

Remiantis ilgalaikiais (vykdomais nuo 1967 ir 2000 m.) tyrimais, atliktais vertinant įvairaus intensyvumo žemės dirbimo technologijų, tarpinių pasėlių, tręšimo mineralinėmis ir organinėmis trąšomis bei sėjomainos įtaką dirvožemio savybėms ir augalų produktyvumui, nustatyta, kad tiesioginės sėjos be žemės dirbimo (*no-till*) ir minimalaus žemės dirbimo technologijos, pastovus organinės medžiagos su įvairiu C ir N santykiu įnešimas ir augalų įvairovė yra esminiai tvaraus žemės ūkio elementai. Tiesioginės sėjos be žemės dirbimo (*no-till*) ir minimalaus žemės dirbimo technologijos su tarpinių pasėlių auginimu – pagrindinė kryptis mažinant CO₂ emisijas ir gerinant dirvožemio sveikatą. Organinių trąšų naudojimas kartu su sėjomaina ir ankštiniais augalais – veiksmingiausias būdas skatinti anglies kaupimą ir

mikrobiologinį aktyvumą. Trumpalaikiai derliaus svyravimai pereinamuoju į tiesioginės sėjos be žemės dirbimo (*no-till*) ar minimalaus žemės dirbimo technologiją laikotarpiu turi būti vertinami kaip ilgalaikė investicija į dirvožemio sveikatą ir tvarų ūkininkavimą, nes ilgainiui žemės ūkio augalų produktyvumas padidėja. Dirvožemio biologinis aktyvumas ir fermentų veikla yra patikimi dirvožemio sveikatos indikatoriai ir gali būti įtraukti į ūkių dirvožemio stebėsenos programas. Tvarus žemės ūkis grindžiamas kompleksiniu požiūriu – sėjomaina, organine medžiaga, tiesiogine sėja ar nearimine technologija ir biologinių procesų dirvožemyje palaikymu.

Šios rekomendacijos skirtos ūkininkams, konsultantams ir politikos formuotojams, siekiant mažinti klimato kaitos poveikį, gerinti dirvožemio sveikatą ir ilgalaikį produktyvumą.

NAUDOTOS LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Acksel, A., ir kt., 2016. Soil organic matter characteristics as indicator of Chernozem genesis in the Baltic Sea region. *Geoderma Regional*, 7 (2), 187-200.
2. Amelung, W. et. al. 2020. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. *Nat. Commun.*, 11, 1–10.
3. Assuncao ir kt., 2029. Carbon input and the structural quality of soil organic matter as a function of agricultural management in a tropical climate region of Brazil. *Sci. Tot. Environ.*, 685, 901-911.
4. Borase, D. N.; Nath, C. P.; Hazra, K. K.; Senthilkumar, M.; Singh S. S.; Praharaj, C. S.; Singh, U.; Kumar, N. 2020. Long-term impact of diversified crop rotations and nutrient management practices on soil microbial functions and soil enzymes activity. *Ecological Indicators*, vol. 114, 106322.
5. Blanco-Canqui, H., Lal, R. 2008. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment. *Soil Sci Soc Am J* 72:693–701.
6. Blanco-Canqui, H., Lal, R., 2023. *Soil Conservation and Management*. Springer Nature. 616 p.
7. Buivydaite, V., Vaičys, M., Juodis, J., Motuzas, A. 2001. Lietuvos dirvožemių klasifikacija. Ser. „Lietuvos mokslas“, kn. 34. Vilnius: Lietuvos mokslas, 139 p.
8. Cengiz, A.; Çakilli, H.; Ateş, Ö.; Taşpınar, K.; Yalçın, G.; Polat, M.; Yüce, E. 2025. Effects of different tillage techniques on soil enzymes and organic carbon in semi-arid conditions. *Chemistry and Ecology*, vol. 41, No. 9, 1151–1161
9. Chavarria, D.; Verdenelli, R. A.; Serri, D. L.; Restovich, S.; Andriulo, A.; Meriles, J. M.; Gil, S. V. 2016. Effect of cover crops on microbial community structure and related enzyme activities and macronutrient availability. *European Journal of Soil Biology*, vol. 76, p. 74–82.
10. Chunderova, A. I. 1973. *The Enzymatic Activity of Sod-Podzolic Soils of the North-Western Region: Doctoral Dissertation*. Tallinn University, Tallinn, Estonia, 46 p.
11. Churchman, G.J., 2018. Game Changer in Soil Science. Functional role of clay minerals in soil. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 181, 99–103.
12. Cotrufo, M.F., ir kt., 2019. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nat. Geosci.* 12 (12), 989–994.
13. Davidson, E.A., Janssens, I.A., 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440, 165–173.
14. De Nobili, M. 2019. Comment on “Humic Substances Extracted by Alkali Are Invalid Proxies for the Dynamics and Functions of Organic Matter in Terrestrial and Aquatic Ecosystems,” by Kleber and Lehmann (2019). *J. Environ. Qual.*, 48, 787–789.
15. Di, J. ir kt., 2018. Combinations of soil properties, carbon inputs and climate control the saturation deficit dynamics of stable soil carbon over 17-year fertilization. *Sci Rep* 8, 12653.
16. Eden, M., ir kt., 2017. Organic waste recycling in agriculture and related effects on soil water retention and plant available water: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 37.
17. Erdel, E.; Şimşek, U. 2023. Effects of soil conservation management systems on soil Enzyme activities under wheat cultivation. *Pol. J. Environ. Stud.*, vol. 32, No. 2, 1105–1111.
18. Farooq, T. H.; Kumar, U.; MO, J.; Shsakoor, A.; Wang, J.; Rashid, M. H. U.; Tufail, M. A.; Chen, X.; Yan, W. 2021. Intercropping of peanut–tea enhances soil enzymatic activity and soil nutrient status at different soil profiles in subtropical southern China. *Plants*, vol. 10, 881.
19. Feiza, V., ir kt. 2010. Sustainable tillage: results from long-term field experiments on Cambisol. *Žemdirbystė- Agriculture*. Vol. 97. No. 2. P. 3–14.

20. Feng, H.; Abagandura, G. O.; Senturklu, S.; Landblom, D. G.; Lai, L.; Ringwall, K.; Kumar, S. 2020. Soil quality indicators as influenced by 5-year diversified and monoculture cropping systems. *The Journal of Agricultural Science*, 158(7), 1–12.
21. Flowera K.C., ir kt., 2021. Crop rotation can be used to manipulate residue levels under no-tillage in a rainfed Mediterranean-type environment. *Soil & Tillage Research*, 212, 105062.
22. Fuss, S. ir kt., 2018. Negative emissions—part 2: costs, potentials and side effects. *Environ. Res. Lett.*, 13, 063002.
23. Gelybó, G., Barcza, Z., Dencső, M., Potyó, I., Kása, I., Horel, Á., ... & Tóth, E. (2022). Effect of tillage and crop type on soil respiration in a long-term field experiment on chernozem soil under temperate climate. *Soil and Tillage Research*, 216, 105239.
24. Glaser, B., Amelung, W. 2003. Pyrogenic carbon in native grassland soils along a climosequence in North America. *Global Biogeochemical Cycles*, 17 (2), 33-1, 33-8.
25. Gregory, A.S., ir kt., 2009. The effect of long-term soil management on the physical and biological resilience of a range of arable and grassland soils in England. *Geoderma*, 153, 172–185.
26. Haddix, M.L., ir kt., 2020. Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil. *Geoderma*, 363, 114160.
27. Haubold-Rosar, M., ir kt., 2016. Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden. UBA Bericht 4
28. Hayes, M.H.B., ir kt., 2010. Acquisition of essential data for assessments of carbon sequestration by soils. EPA (Ireland) STRIVE Report Series 58.
29. Hayes, M.H.B., ir kt., 2017. Chapter Two - Humin: Its Composition and Importance in Soil Organic Matter, in: Sparks, D.L.B.T.-A. in A. (Ed.), . Academic Press, 47–138.
30. Hayes, M.H.B., Swift, R.S. 2020. Chapter One - Vindication of humic substances as a key component of organic matter in soil and water, in: Sparks, D (Ed.), Acad. Press, pp. 1–37.
31. Hicks Pries, ir kt., 2017. The whole-soil carbon flux in response to warming. *Science*, 355, 1420–1423.
32. Jenkinson, D.S. 1990. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 329, 361–368.
33. Kang, X., ir kt., 2011. Modeling impacts of climate change on carbon dynamics in a steppe ecosystems in Inner Mongolia, China. *J. Soils Sediments*, 11, 562–576.
34. Kobierski, M.; Lemanowicz, J.; Wojewódzki P.; Kondratowicz-Maciejewska, K. 2020. The effect of organic and conventional farming systems with different tillage on soil properties and enzymatic activity, *Agronomy*, vol. 10, 1809.
35. Kome, G.K., ir kt., 2019. Influence of Clay Minerals on Some Soil Fertility Attributes: A Review. *Open J. Soil Sci.*, 09, 155–188.
36. Kondratowicz-Maciejewska, K.; Lemanowicz, J.; Jaskulska, I. 2025. Effects of long-term multi-treatment experiments on organic matter and enzymatic activity in sandy soil. *Sustainability*, vol. 17, 3252.
37. Kögel-Knabner, I., Wiesmeier, M., & Mayer, S. (2023). Mechanisms of soil organic carbon sequestration and implications for management.
38. Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123, 1–22.
39. Lal, R., 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 80, 304, 1623–1627.
40. Lampurlanes, J.; Cantero – Martinez, C. 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. *Agronomy journal*, vol. 95, iss. 3, p. 526–536.
41. Lavallee J.M., ir kt., 2020. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century, *Glob Change Biol.*, 26:261–273.

42. Lee, S. H.; Kim, M. S.; Kim, J. G.; Kim, S. O. 2020. Use of soil enzymes as indicators for contaminated soil monitoring and sustainable management. *Sustainability*, vol. 12, p. 1–14.
43. Lehmann, J., Kleber, M. 2015. The continuous nature of soil organic matter. *Nature*, 528, 60–68.
44. Lemanowicz, J.; Bartkowiak, A.; Dębska, B.; Majcherczak, E.; Michalska, A. 2024. Mineral Components, Organic Matter Quality and Soil Enzymatic Activity under the Influence of Differentiated Farmyard Manure and Nitrogen Fertilisation. *Minerals*, vol. 14, 645.
45. Li, Y.; Nie, C.; Liu, Y.; Du, W.; He, P. 2019. Soil microbial community composition closely associates with specific enzyme activities and soil carbon chemistry in a long-term nitrogen fertilized grassland. *Science of the Total Environment*, vol. 654, p. 264–274.
46. Li, T.; Li, G.; Lu, Z.; Zhao, D.; Li, Y.; Wang, Z.; Wen, X.; Liao, Y. 2024. Crop diversification increases soil extracellular enzyme activities under no tillage: A global meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, vol. 235, 105870.
47. Liu, F., Zhang, Y. 2019. Effects of Experimental Warming and CO₂ Concentration Doubling on ¹³C CPMAS NMR Spectra of Humin in Coniferous Forest Ecosystems of the Eastern Tibetan Plateau in China. *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 28, No. 4, 2223–2229.
48. Lupwayi, N. Z.; Turkington, T. K.; Tidemann B. D.; Kubota H., Polo, R. O. 2024. Crop rotation and fungicides impact microbial biomass, diversity and enzyme activities in the wheat rhizosphere. *Frontiers in Agronomy*, vol. 6, 1455448.
49. Ma, Y. H.; Fu, S. L.; Zhang, X. P.; Zhao, K.; Chen, H. Y. 2017. Intercropping improves soil nutrient availability, soil enzyme activity and tea quantity and quality. *Applied Soil Ecology*, vol. 119, p. 171–178.
50. MacDonald, A., ir kt., 2018. Rothamsted Long-Term Experiments: Guide to the Classical and Other Long-term experiments, Datasets and Sample Archive. Rothamsted Research.
51. Melillo, J.M., ir kt., 2017. Long-term pattern and magnitude of soil carbon feedback to the climate system in a warming world. *Science* 358, 101–105.
52. Mielnik L., ir kt., 2021. Changes in soil hydrophobicity and structure of humic substances in sandy soil abandoned from cultivation. *Agric. Ecosystem and Environment*, 319, 107554.
53. Mikutta, R., ir kt., 2019. Microbial and abiotic controls on mineral-associated organic matter in soil profiles along an ecosystem gradient. *Sci. Rep.* 9, 1–9.
54. Minasny, B., McBratney, A.B. 2018. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *Eur. J. Soil Sci.*, 69, 39–47.
55. Mirzavand, J.; Asadi-Rahmani, H. 2020. Effect of different tillage practices on phosphatase and urease activities in calcareous soil. *Journal of Soil Biology*, vol. 8(1), p. 15–24.
56. Myneni, S.C.B. 2019. Chemistry of Natural Organic Matter—The Next Step: Commentary on a Humic Substances Debate. *J. Environ. Qual.*, 48, 233–235.
57. Nath, C. P.; Kumar, N.; Das, K.; Hazra, K. K.; Praharaj, C. S.; Singh, N. P. 2021. Impact of variable tillage based residue management and legume based cropping for seven years on enzymes activity, soil quality index and crop productivity in rice eology. *Environmental and Sustainability Indicators*, vol. 10, p. 1–11.
58. Ndzelu B.S., ir kt., 2021. Tillage effects on humus composition and humic acid structural characteristics in soil aggregate-size fractions. *Soil and Tillage Research*, 213, 105090.
59. Olk, D.C., ir kt., 2019a. Environmental and Agricultural Relevance of Humic Fractions Extracted by Alkali from Soils and Natural Waters. *J. Environ. Qual.*, 48, 217–232.
60. Olk, D.C., ir kt., 2019b. Using Humic Fractions to Understand Natural Organic Matter Processes in Soil and Water: Selected Studies and Applications. *J. Environ. Qual.*, 48, 1633–1643.
61. Parton, W., ir kt., 1988. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils – A model. *Biogeochemistry*, 5, 109–131.
62. Pittelkow, C. M., Liang, X., Linquist, B. A., Van Groenigen, K. J., Lee, J., Lundy, M. E., ... & Van Kessel, C. (2015). Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*, 517(7534), 365–368.

63. Poeplau, C., ir kt., 2018. Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – A comprehensive method comparison. *Soil Biol. Biochem.*, 125, 10–26.
64. Rankoth, L. M.; Udawatta, R. P.; Veum, K. S.; Jose, S.; Alagele, S. 2019. Cover crop influence on soil enzymes and selected chemical parameters for a claypan corn–soybean rotation. *Agriculture*, vol. 9, p. 1–13.
65. Rao, C. S.; Grover, M.; Kundu, S.; Desai, S. 2017. *Soil Enzymes*. Encyclopedia of Soil Science. Taylor and Francis, p. 2100–2107.
66. Rawls, W.J. 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma* 116, 61–76.
67. Sarkar, B., ir kt., 2018. Chapter 3 - Clay Minerals—Organic Matter Interactions in Relation to Carbon Stabilization in Soils, in: Garcia, C., ir kt., (Eds.). Academic Press, 71–86.
68. Shipitalo, M. J.; Dick, W. A.; Edwards, W. M. 2000. Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals. *Soil and tillage research*, 53.3: 167-183.
69. Six, J. ir kt., 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.*, 79, 7–31.
70. Six J., ir kt., 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for Csaturation of soils. *Plant and soil*, 241, 155-176.
71. Sokol, N.W., ir kt., 2019. Pathways of mineral-associated soil organic matter formation: Integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry. *Glob. Chang. Biol.*, 25 (1), 12–24.
72. Szostek M.; Szpunar-Krok, E.; Pawlak, R.; Stanek-Tarkowska, J.; Ilek, A. 2022. Effect of different tillage systems on soil organic carbon and enzymatic activity. *Agronomy*, vol. 12(1), 208.
73. Stevenson F.J. 1994. *Humus Chemistry; Genesis, Composition, Reaction*. 2nd ed. John Wiley & Sons., New York.
74. Teagasc – the Agriculture and Food Development Authority. 2020. Enhancing soil carbon sequestration to contribute to carbon neutrality on Irish farms. Teagasc Daily, June 14, <https://www.teagasc.ie/publications/2020/enhancing-soil-carbon-sequestration-to-contributeto-carbon-neutrality-on-irish-farms.php>
75. Tao, F., Palosuo, T., Lehtonen, A., Heikkinen, J., & Mäkipää, R. 2023. Soil organic carbon sequestration potential for croplands in Finland over 2021–2040 under the interactive impacts of climate change and agricultural management. *Agricultural Systems*, 209, 103671.
76. Tebrugge, F.; Bohrsen, A. 2001. Farmers and experts opinion on no-tillage in West Europe and Nebraska. *Conservation agriculture. A world-wide challenge*, 1: 61-71.
77. Tyler, H. L. 2020. Winter cover crops and no till management enhance enzyme activities in soybean field soils. *Pedobiologia*, vol. 81–82, 150666.
78. Trumbore, S.E. (2009). Radiocarbon and soil carbon dynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37, 47–66.
79. Ursu, A.; Cara, I. G.; Bireescu, G.; Rusu, M.; Miha, G. D.; Cakpo, S. S.; Topa, D.; Jităreanu, G. 2025. Effects of tillage systems and bacterial inoculation on enzyme activities and selected soil chemical properties. *Agriculture*, vol. 15, 1285.
80. Wang, H.; Wu, J.; Li G.; Yan, L. 2020. Changes in soil carbon fractions and enzyme activities under different vegetation types of the northern Loess Plateau. *Ecology and Evolution*, vol. 10(21), p. 12211–12223.
81. Wang, L.; Kaur, M.; Zhang, P.; Li, J.; Xu, M. 2021. Effect of different agricultural farming practices on microbial biomass and enzyme activities of celery growing field soil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18(23), 12862.
82. Wang, Y., Li, J., Gao, X., Li, X., Ren, T., Cong, R., & Lu, J. 2014. Winter oilseed rape productivity and nutritional quality responses to zinc fertilization. *Agronomy Journal*, 106(4), 1349-1357.

83. Wang, X., et al. 2019. The effect of no-tillage and reduced tillage on soil properties and crop performance. *Agronomy Journal*, 111(5), 2302–2314.
84. Weber J., ir kt., 2021. Optimized isolation method of humin fraction from mineral soil material. *Environmental Geochemistry and Health*, 1-10.
85. Wei, J.; Guo, S; Sun, B.; Zhai, L.; Wang, H.; Liu, H.; Hua, L., Yang, B. 2018. Effects of winter cover crops on soil nutrients and microbial properties of cinnamon soil. *Journal of Ecology and Rural Environment*, vol. 34(5), p. 426–432.
86. Wen L.; Peng Y.; Zhou Y.; Cai G.; Lin Y.; Li, B. 2023. Effects of conservation tillage on soil enzyme activities of global cultivated land: A meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, vol. 345, No. 1, 118904.
87. Williams, A., ir kt., 2016. Soil water holding capacity mitigates downside risk and volatility in US rainfed maize: Time to invest in soil organic matter? *PLoS One* 11, 1–11.
88. Zhang, L.; Baoyin, B.; Cui, J.; Ma, J.; Zhao, Z.; Wang, H.; Duan, R.; Li, Q. 2025. Crop rotation improves soil biological properties and spring maize yield in Northeast China. *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 24, 102439.
89. Zhang, P.; Chen, X.; Wei, T.; Yang, Z. 2016. Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China. *Soil and Tillage Research*, vol. 160, p. 65–72.

Publikacijos:

1. Edyta Hewelke, Jerzy Weber, Lilla Mielnik, Riccardo Spaccini, Dariusz Gozdowski, Marek Podlasiński, Irmína Ćwieląg-Piasecka, Elżbieta Jamróz, Maria Jerzykiewicz, Aneta Perzanowska, Vaclovas Bogužas, Lina Skinulienė, Magdalena Dębicka. Effect of 55 years of different soil management on soil physical properties and stability of soil organic matter // *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 396 (2026) 110005, ISSN 0167-8809, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.110005>.
2. Sinkevičienė, Aušra; Bogužas, Vaclovas; Sinkevičius, Alfredas; Steponavičienė, Vaida; Lenkis, Anicetas; Kimbirauskienė, Rasa. Weed abundance, seed bank in different soil tillage systems, and straw retention // *Agronomy*, 2025, t. 15, nr. 5, p. 1 - 25, ISSN 2073-4395. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051105>.
3. Skinulienė, Lina; Marcinkevičienė, Aušra; Dorelis, Mindaugas; Bogužas, Vaclovas. The effect of long-term crop rotations for the soil carbon sequestration rate potential and cereal yield // *Agriculture*, 2024, t. 14, nr. 3, p. 1 - 16, ISSN 2077-0472. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030483>.
4. Rudinskienė, Aušra; Marcinkevičienė, Aušra; Velička, Rimantas; Steponavičienė, Vaida. The effects of incorporating caraway into a multi-cropping farming system on the crops and the overall agroecosystem // *Agronomy*, 2024, t. 14, nr. 3, p. 1 - 23, ISSN 2073-4395. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030625>
5. Steponavičienė, V., Žiūraitis, G., Rudinskienė, A., Jackevičienė, K., Bogužas, V. (2024). Long-Term Effects of Different Tillage Systems and Their Impact on Soil Properties and Crop Yields. *Agronomy*, 14(4), 870. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040870>
6. Steponavičienė, V., Rudinskienė, A., Žiūraitis, G., & Bogužas, V. (2023). The Impact of Tillage and Crop Residue Incorporation Systems on Agrophysical Soil Properties. *Plants*, 12(19), 3386. *Plants* 2023, 12(19), 3386; <https://doi.org/10.3390/plants12193386>
7. Weber, Jerzy; Leinweber, Peter; Kuzyakov, Yakov; Hewelke, Edyta; Frąć, Magdalena; Hayes, Michael; Bogužas, Vaclovas ; Mielnik, Lilla; Leahy, James J; Norton, Urszula; Gregory, Andy; Jerzykiewicz, Maria; Spaccini, Riccardo; Stępień, Wojciech; Di Meo, Vincenzo; Jamroz, E; Cwieląg-Piasecka, I; Kocowicz, A; Debicka, M; Parylak, D; Perzanowska, A; Uzarowicz, L; Gozdowski, D; Papierowska, E; Pertile, G; Gryta, A; Oszust, K; Panek, J; Podlasinski, M; Cozzolino, V; Piccolo, A; Kriaučiūnienė, Zita; Vaisvalavičius, Rimantas ; Steponavičienė, Vaida; Aleinikovienė, Jūratė ; Ekardt, F. Soil organic matter properties and carbon sequestration // 31st Congress of soil science society of Poland : soil in the changing world, September 11-16, 2023 : book of abstracts, 2023, p. 77 - 78. Prieiga per internetą: < <https://hdl.handle.net/20.500.12259/256927> >
8. 9 sveiko dirvožemio principai. Mano ūkis, 2023 lapkričio mėn.

Pranešimai tarptautinėse konferencijose:

2025 m.

1. Steponavičienė V., Bogužas V. Impact of tillage practices, crop residue management, and intercropping on long-term soil health and sustainability. EUROSOIL kongresas, 2025 rugsėjo 7-12 d.

2024 m.

2. Hewelke E., Weber J., Leinweber P., Mielnik L., Kocowicz A., Jamroz E., Steponavičienė V., Bogužas V., Podlasiński M., Gozdowski D., Perzanowska A., Uzarowicz Ł. Soil health and carbon sequestration under long-term different organic fertilization. 5th International Scientific Conference AgroEco2024, Agroecosystems Sustainability: Links between

Carbon Sequestration in soils, food security and climate change. Kaunas, Lithuania, 16-18 October 2024.

3. Hewelke E., Weber J., Leinweber P., Mielnik L., Kocowicz A., Jamroz E., Steponavičienė V., Boguzas V., Podlasiński M., Perzanowska A., Uzarowicz Ł. The impact of over a century of different organic fertilization on the properties of soil organic matter and water holding capacity. The EJP SOIL Annual Science Day. 10 – 14.06.2024, Vilnius, Lithuania.
4. Hewelke E., Leinweber P., Weber J., Mielnik L., Kocowicz A., Jamroz E., Steponavičienė V., Boguzas V., Perzanowska A., Norton U. One hundred two years of organic fertilization and the formation and stabilization of soil organic matter. IUSS International Conference 100 years of Soil Science, Florence, Italy, 19-21.05.2024.
5. Mielnik L., Weber J., Boguzas V., Podlasiński M., Kocowicz A. The influence of long-term use of rye and corn monocultures and different fertilization on the spectroscopic properties of soil organic matter. IUSS International Conference 100 years of Soil Science, Florence, Italy, 19-21.05.2024.
6. Mielnik L., Weber J., Boguzas V., Hewelke E., Kocowicz A., Skinulienė L., Kriauciūnienė Z., Jamroz E., Podlasiński M., Ćwieląg-Piasecka I., Gozdowski D. The impact of 55 years different soil management on the spectroscopic properties of soil organic matter. The EJP SOIL Annual Science Day. 10 – 14.06.2024, Vilnius, Lithuania.
7. Steponavičienė V., Bogužas V., Žiūraitis G., Long-term resilience of soil organic carbon stocks to climate change through tillage and residue management. IUSS International Conference 100 years of Soil Science, Florence, Italy, 19-21.05.2024, poster.
8. Bogužas V., Steponavičienė V., Aleinikovienė J. Long-term effects of different intensity soil management on soil organic carbon. 9th International Symposium on Soil Organic Matter. Ben Guerir, Morocco. 26-31.05.2024, oral.
9. Steponavičienė V., Bogužas V. Long-term trends in soil organic carbon: Insights from comprehensive measurements. The 22nd International Soil Tillage Research Organisation (ISTRO) International Conference “Living Roots, Living Soil” in Virginia Sep 23-27, 2024, VA, USA, poster.
10. Žiūraitis G., Bogužas V., Steponavičienė V., „Long-term straw management and tillage for climate resilience in agroecosystems sustainability” Conference “Resolving Environmental and Climate Change issues in agriculture” (REACH) will be held in Lithuanian Academy of Sciences, Vilnius, Lithuania on October 8-9, 2024, oral.
11. Žiūraitis G., Steponavičienė V., Aleinikovienė J., Bogužas V. Long-term effects of tillage, crop residues, and intercropping combination on soil health. 5th International Scientific Conference AgroEco2024, Agroecosystems Sustainability: Links between Carbon Sequestration in soils, food security and climate change. Kaunas, Lithuania, 16-18 October 2024, poster.
12. Lina Skinulienė, Aušra Marcinkevičienė, Jerzy Weber, Vaclovas Bogužas, Edyta Hewelke. Effects of long-term crop rotation, rye monoculture and continuous black fallow on soil enzyme sucrase and urease activity. 5th International Scientific Conference AgroEco2024, Agroecosystems Sustainability: Links between Carbon Sequestration in soils, food security and climate change. Kaunas, Lithuania, 16-18 October 2024, poster.
13. Zita Kriauciūnienė. Long-term experiments on agroecosystem sustainability and soil management in Lithuania. 5th International Scientific Conference AgroEco2024, Agroecosystems Sustainability: Links between Carbon Sequestration in soils, food security and climate change. Kaunas, Lithuania, 16-18 October 2024, oral.

2023 m.

14. Weber J., Leinweber P., Kuzyakov Y., Hewelke E., Frac M., Hayes M., Boguzas V., Mielnik L., Leahy J.J., Norton U., Gregory A., Jerzykiewicz M., Spaccini R., Stępień W., Di Meo V. Soil management effects on soil organic matter properties and carbon sequestration (SOMPACS). General Assembly of the European Geosciences Union, 12-29.04.2023, oral, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-1101>

15. Weber J., Leinweber P., Kuzyakov Y., Hewelke E., Frąć M., Hayes M., Boguzas V., Mielnik L., Leahy J.J., Norton U., Gregory A., Jerzykiewicz M., Spaccini R., Stępień W., Di Meo V., Jamroz E., Kocowicz A., Ćwieląg-Piasecka I., Dębicka M., Parylak D., Perzanowska A., Uzarowicz Ł. Soil management effects on soil organic matter properties and carbon sequestration (SOMPACS). The EJP SOIL Annual Science Day. 12 – 16.06.2023, Ryga, Łotwa, poster.
16. Weber J., Leinweber P., Kuzyakov Y., Hewelke E., Frąć M., Hayes M., Boguzas V., Mielnik L., Leahy J.J., Norton U., Gregory A., Jerzykiewicz M. Soil management effects on soil organic matter properties and carbon sequestration (SOMPACS). 21st International Conference of the IHSS, IHSS2023, Santiago, Chile, 6 -11.08.2023, poster.
17. Weber J., Leinweber P., Kuzyakov Y., Hewelke E., Frąć M., Hayes M., Boguzas V., Mielnik L., Leahy J., Norton U., Gregory A., Jerzykiewicz M., Spaccini R., Stępień W., Di Meo V., Jamroz E., Ćwieląg-Piasecka I., Kocowicz A., Dębicka M., Parylak D., Perzanowska A., Uzarowicz Ł., Gozdowski D., Papierowska E., Pertile G., Gryta A., Oszust K., Panek J., Podlasiński M., Cozzolino V., Piccolo A., Kriauciuniene Z. Vaisvalvicius R. Stepanoviciene V., Aleinikoviene J., Ekardt F. Soil organic matter properties and carbon sequestration., 31st Congress of the Soil Science Society of Poland. Poznań, Poland, 11–15 September 2023, oral.
18. Weber J., Leinweber P., Kuzyakov Y., Hewelke E., Frąć M., Hayes M., Boguzas V., Mielnik L., Leahy J.J., Norton U., Gregory A., Jerzykiewicz M., Spaccini R., Stępień W., Di Melo V., Dębicka M., Jamroz E., Kocowicz A., Ćwieląg-Piasecka I., Parylak D., Perzanowska A., Uzarowicz Ł. Soil management effects on soil organic matter properties and carbon sequestration (SOMPACS). 2nd Joint International Symposium on Environmental Biogeochemistry and Subsurface Microbiology. Canada, poster.
19. Steponavičienė, V.; Bogužas, V. ; Rudinskienė, A. ; Žiūraitis, G. “The effects of soil tillage system and straw retention on soil properties in spring barley” // Agrosym 2023: XIV international scientific agriculture symposium, Jahorina, October 05 - 08, 2023, t. 14, p. 158 - 158, online poster <https://hdl.handle.net/20.500.12259/258100>
20. Steponavičienė, V. ; Bogužas, V. . Soil properties as reflected by long-term complex measures // Wageningen Soil Conference 2023, August 28 - September 1, p. 104 - 104. poster <https://hdl.handle.net/20.500.12259/256781> .
21. Žiūraitis, G. ; Bogužas, V. ; Steponavičienė, V. . Long-term impact assessment of tillage systems on agroecosystems // ICA 2023 : 14th international conference on agrophysics 11-13 September 2023, Lublin, Poland, t. 14, p. 173 - 173, poster <https://hdl.handle.net/20.500.12259/257534> .

2022 m.

22. Žiūraitis G, Bogužas V., Butkevičienė L.M., Vaida Steponavičienė V., Rudinskienė A. Effects of reduced tillage, straw and green manure on components of the winter oilseed rape agroecosystem Vytautas Magnus University (Lithuania)The 11th International Scientific Conference RURAL DEVELOPMENT 2023: Bioeconomy for the Green Deal 26-28 September, 2023, poster.
23. Steponavičienė, V, Bogužas, V. ir Skinulienė, L. “Soil organic carbon as reflected by long-term complex measures. Trends and challenges in soil-crop management” 2nd Central European ISTRO Conference (CESTRO) and 8th International Conference of the Czech ISTRO branch Trends and challenges in soil-crop management" September, 6 – 8, 2022, Brno, Czech Republic, poster.
24. Skinulienė L., Bogužas V., Steponavičienė .V., Hewelke E. "The influence of different long-term crop rotations on soil hydrophysical properties in spring barley crops". 4th International Scientific Conference "Agroecosystems Sustainability: Links between Carbon Sequestration in Soils, Food Security and Climate Change". VMU , Lithuania, 2022 10 26, poster.

25. Steponavičienė V., Bogužas V., Skinulienė L. ir Wyzinska M. "Long-term impact of reduced intensity tillage systems combinations on soil properties". 4th International Scientific Conference "Agroecosystems Sustainability: Links between Carbon Sequestration in Soils, Food Security and Climate Change". VMU, Lithuania. 2022 10 26, poster.
26. Žiūraitis G., Bogužas V., Skinulienė L., Perzanowska A. "Soil properties after long-term reduced tillage, no-till and residue management". 4th International Scientific Conference "Agroecosystems Sustainability: Links between Carbon Sequestration in Soils, Food Security and Climate Change". VMU, Lithuania. 2022 10 26, poster.
27. Rudinskienė, Aušra; Marcinkevičienė, Aušra; Velička, Rimantas; Kosteckas, Robertas; Steponavičienė, Vaida. Soil biological properties in the agroecosystems with diverse and multifunctional crop cultivation. The 11th International Scientific Conference "Rural Development 2023". VDU ŽŪA. 2023 09 26.
28. Weber J., Leinweber P., Kuzyakov Y., Hewelke E., Frac M., Hayes M., Boguzas V., Mielnik L., Leahy J., Norton U., Gregory A., Jerzykiewicz M., Spaccini R., Stępień W., Di Meo V., Jamroz E., Ćwieląg-Piasecka I., Kocowicz A., Dębicka M., Parylak D., Perzanowska A., Uzarowicz Ł., Gozdowski D., Papierowska E., Pertile G., Gryta A., Oszust K., Panek J., Podlasiński M., Cozzolino V., Piccolo A., Kriauciuniene Z., Vaisvalavicius R., Stepanoviciene V., Aleinikoviene J., Ekardt F.: Soil organic matter properties and carbon sequestration. 31st Congress of soil science society of Poland: soil in the changing world. Poznań University of Life Sciences. September 11-16, 2023 09 14.

SUDERINTA:

(Tyrimų priežiūros komisijos pirmininkas)

(Vardas, Pavardė)

(Data)