

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS
JŪROS TECHNOLOGIJŲ IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS
GAMTOS MOKSLŲ KATEDRA

**FOSFORO JUNGINIŲ PATEKIMO Į PAVIRŠINIUS
VANDENIS VERTINIMAS, TAIKANT SKIRTINGAS
AGROPRIEMONES**

Jūrų hidrologijos studijų programos magistro baigiamasis darbas

Autorė

JMNJH18 Gabrielė Jucė

Vadovė

Prof. Dr. Inga Dailidienė

Reg. nr.....

Klaipėda, 2020

SANTRAUKA

Gabrielė Jucė

FOSFORO JUNGINIŲ PATEKIMO Į PAVIRŠINIUS VANDENIS VERTINIMAS, TAIKANT SKIRTINGAS AGROPRIEMONES

Jūrų hidrologijos studijų programos magistro baigiamasis darbas

Darbo vadovė: Prof. Dr. Inga Dailidienė

Konsultantė: Dr. Danutė Karčauskienė

Klaipėdos universitetas

Jūros technologijų ir gamtos mokslų fakultetas

Gamtos mokslų katedra

Klaipėda, 2020

Darbo apimtis: 49 psl., 7 lent., 19 pav.

Pagrindiniai žodžiai: šlaitai, dirvožemio erozija, fosforo junginiai, dirvožemio agregatai, nuotėkis.

Darbe išanalizuoti archyviniai erozijos stacionarų duomenys ir 2019 m. vasarą vykdyti eksperimentai Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centro (LAMMC) Vėžaičių filialo dvejuose dirvožemio erozijos stacionaruose su skirtingo statumo 7–9° ir 9–11° kalvų šlaitais. Dirvožemis – menkai ir vidutiniškai eroduotas balkšvažemis (*Albeluvisol*). Kiekviename stacionare tirtos dvi skirtingos agropriemonės – lauko augalų (javų) sėjomaina su juodoju pūdymu ir netręšiamas ir nenaudojamas žolynas. Tyrimo metais stacionaruose auginti žieminiai miežiai, žieminiai kviečiai bei daugiamečių varpinių žolių mišinys (žolynas).

Išanalizavus trijų metų archyvinius erozijos stacionarų tyrimo duomenis, nustatyta, kad fosforo junginių netekimas iš agroekosistemos dirvožemio priklausė nuo kalvos šlaito statumo ir jame augusių augalų. Su nuotėkiu nuo 9–11° kalvos šlaito netenkama ~3 kartus daugiau fosfatų (PO_4) ($0,40 \text{ mg l}^{-1}$) nei nuo mažesnio statumo 7–9° šlaito ($0,15 \text{ mg l}^{-1}$). Fosfatų (PO_4) nuostoliai su šlaitu nutekėjusiu vandeniu ~2 kartus didesni šlaite padengtame sėjomainos augalais ($0,37 \text{ mg l}^{-1}$), kur kasmet atliekamas žemės dirbimas, nei šlaite padengtame daugiametėmis žolėmis ($0,18 \text{ mg l}^{-1}$).

Tyrimai atlikti 2019 metais parodė, kad gausių kritulių (15,70 mm) metu mažiausias (3,00 l) nutekėjusio vandens kiekis buvo 7–9° kalvos šlaite, kuriame augo daugiametės žolės, o didžiausias (230,00 l) nuotėkis nustatytas 9–11° kalvos šlaite, kuriame augo sėjomainos augalai. Fosfatų (PO_4) nuostoliai 9–11° šlaite užimtame sėjomainos augalais sudarė 0,32 mg l⁻¹ ir buvo 28 % didesnis nei to paties statumo šlaite, kuriame augo daugiametės žolės. Su nuotėkiu daugiausia nuplauta dirvožemio (242,0 kg) ir judriojo fosforo (P_2O_5) (207,0 mg kg⁻¹) nuo statesniojo (9–11°) kalvos šlaito, kurio dirvožemis lengvos granulimetrinės sudėties (rišlus smėlis-vidutinio sunkumo priemolis) užimtas sėjomainos augalais. Dirvožemio ir fosforo junginių nuostolių nenustatyta mažesnio statumo (7–9°) kalvos šlaite užimtame daugiametėmis žolėmis. Tarp fosfatų (PO_4) kiekio ir nutekėjusio vandens kiekio buvo labai silpna priklausomybė ($R^2 = 0,16$), tačiau labai stipri tarp dirvožemio nuostolių ir vandens nuotėkio šlaitu ($R^2 = 0,99$).

Lauko augalų sėjomainoje su juoduoju pūdymu organinio ir neorganinio bei judriojo fosforo (P_2O_5) kiekiai skirtingo statumo šlaituose ir atskirose šlaito dalyse buvo nevienodi. Didžiausias (0,31 mg kg⁻¹) organinio fosforo kiekis nustatytas mažesnio (7–9°) statumo kalvos šlaito apatinėje akumuliacinėje dalyje, kurios dirvožemyje vyrauja molio frakcija. Priešingai, judriojo fosforo (P_2O_5) didžiausi kiekiai (189,00 ir 195,00 mg kg⁻¹) nustatyti statesniojo (9–11%) šlaito viršutinėje ir vidurinėje dalyse, kurių dirvožemis – rišlus smėlis, ir tai siejama su šio dirvožemio maža drėgmės sorbcija, silpnu augalų vystymusi ir mažu judriojo fosforo panaudojimu biomasės augimui. Labiau eroduojamoje viršutinėje šlaito dalyje organinis ir mineralinis fosforas turėjo tendenciją kauptis 2,0–1,0 mm dydžio mezoagregatuose, kurie šiuose dirvožemiuose sudaro 14,28 % ir 4,72 %. Šių agregatų kiekio ir patvarumo vandens poveikiui didinimas yra vienas iš būdų mažinant fosforo nuostolius kalvoto reljefo dirvožemyje. Šiuo atžvilgiu daugiametis žolynas yra pranašesnis nei sėjomainos augalai.

SUMMARY

Gabrielė Jucė

ESTIMATION OF PHOSPHORUS COMPOUNDS IN SURFACE WATER USING DIFFERENT SOIL AND CROP MANAGEMENT PRACTICES

Master's thesis of Marine Hydrology studies

Supervisor: Prof. Dr. Inga Dailidienė

Consultant: Dr. Danutė Karčauskienė

Klaipėda University

Faculty of Marine Technology and Natural Sciences

Department of Natural Sciences

Klaipėda, 2020

Work's size: 49 papers, 7 tables, 19 pictures

Key words: slopes, soil erosion, phosphorus compounds, soil aggregates, surface runoff.

The work analyzes the archival data of erosion stationaries and the experiments, which were carried out in two soil erosion stationaries of the Vėžaičiai Branch of the Lithuanian Center of Agrarian and Forest Sciences (LRCAF) on the slopes of 7–9 ° and 9–11 ° hills, conducted in the summer of 2019. Soil was poorly and moderately eroded *Albeluvisol*. Two different types of crop rotation were tested in each stationary –crop rotation with black fallow and not fertilized and not used (not mown) grassland. During the investigation period, the winter barley, winter wheat and mixture of perennial grasses were grown in stationaries.

An analysis of the three-year archival data of erosion stationaries showed that the loss of phosphorus compounds from the soil depended on the steepness of the slope of the hill and the plants growing on it. It was determined that the runoff of phosphate (PO_4) from a 9–11° slope hill is approximately 3 times higher ($0,40 \text{ mg l}^{-1}$) than from a shallower 7–9 ° slope hill ($0,15 \text{ mg l}^{-1}$). Losses of phosphates ($0,37 \text{ mg l}^{-1}$) with slope leaked water is ~2 times higher on the slope hill, covered with crop rotation plants where annual tillage is performed, compared with the slope-covered perennial grasses ($0,18 \text{ mg l}^{-1}$).

Studies conducted in 2019 showed that during the periods of heavy rainfall (15,70 mm), the lowest (3,00 l) runoff was on a 7–9 ° hillside with perennial grasses and the highest (230,00 l) runoff

on a 9–11 ° on the hillside where the crop rotation plants were grown. Loss of phosphates (PO_4) on a 9–11 ° slope hill covered with crop rotation plants was 0,32 mg l⁻¹ and it was by 28 % higher compared to a slope hill of the same steepness, where the perennial grasses were grown. The highest runoff of washed away soil (242,00 kg) and mobile phosphorus (P_2O_5) (207,00 mg kg⁻¹) was determined on the 9–11 ° hillside with light granulometric composition (cohesive sand- moderate loam soil) covered with crop rotation plants. Losses of soil and phosphorus compounds were not observed on the 7–9 ° hillside, where perennial grasses were grown. A very weak dependence was determined between the amount of phosphates (PO_4) and the amount of leaked water ($R^2=0.16$), but very strong dependence was determined between the soil loss and water runoff on the slope ($R^2=0.99$).

Amount of organic, inorganic and mobile phosphorus in the crop rotation with black fallow varied in the different slopes and in different part of the slopes. The highest amount of organic phosphorus was determined in the lower steep (7–9°) slope of the hill, where the clay fraction predominates in the soil. In contrast, the highest amount of mobile phosphorus (P_2O_5) (189,00 and 195,00 mg kg⁻¹) were determined in the upper and middle parts of the hillside (9–11%), which granulometric composition was a cohesive sand. This could be related due to the low moisture sorption of this soil, poor plant development and the weak usage of mobile phosphorus for plant biomass growth. Organic and mineral phosphorus tended to accumulate in mesoaggregates of 2,0–1,0 mm (respectively 14,28 % and 4,72 %) in the more eroded upper slope hill. The increase of the quantity and persistence of these aggregates in water is one of the most effective way seeking to reduce phosphorus losses in hilly terrain soil. In this point of view, mixture of perennial grass is superior to crop rotation plants.

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Fosforo (P) ciklo schema dirvožemyje (Kruse et al., 2015).....	6
2 pav. Vietos, kuriose buvo vykdomi bandymai (U – Užpelkiai (1 stacionaras), M – Milaičiai (2 stacionaras)) (Kinderienė, Karčauskienė, 2012).....	18
3 pav. Vakarinės Lietuvos dalies hidrografinis tinklas (žvaigždute pažymėta tyrimų vietovė).....	19
4 pav. Dirvožemio erozijos 1 ir 2 bandymų stacionarų planas kalvos šlaite (Jankauskas, 2008).....	20
5 pav. Sėjomaininis augalas - žieminiai kviečiai (4) ir nešienaujamas žolynas (5) kalvos šlaite (1 stacionaras), 2019 m.....	21
6 pav. Kratytuvas, skirtas dirvožemio agregatinės sudėties įvertinimui (sausas sijojimas).....	22
7 pav. Laboratorinė fosforo junginių analizių schema (Gonzalez Medeiros et al., 2005).....	23
8 pav. Fosforo junginių analizės svarbiausi etapai: tirpalo paruošimas (kratytuvas (2) ir spektrofotometrinei analizei paruošti mėginiai (2)) ir spektrofotometras (3).....	23
9 pav. Tiesinė priklausomybė tarp absorbcijos ir koncentracijos bei lygtis, pagal kurią buvo apskaičiuoti bendrojo, neorganinio ir organinio fosforo kiekiai.....	24
10 pav. Kritulių kiekis (mm) tiriamuoju laikotarpiu (Laukuvos MS duomenys).....	25
11 pav. Fosfatų (PO_4) kiekio (mg l^{-1}) priklausomybė nuo nutekėjusio vandens kiekio (l).....	26
12 pav. Fosfatų (PO_4) nuostoliai priklausomai nuo skirtingo statumo šlaitų.....	27
13 pav. Fosfatų (PO_4) nuostoliai priklausomai nuo skirtingų agropriemonių.....	27
14 pav. Judriojo fosforo (P_2O_5) nuostoliai (kg ha^{-1}) su kalvos šlaitu nuneštu dirvožemiu.....	28
15 pav. Kritulių kiekis (mm) tiriamuoju laikotarpiu (Laukuvos MS duomenys).....	29
16 pav. Dirvožemio nuostolių (kg) priklausomybė nuo nutekėjusio vandens kiekio šlaitu (l).....	31
17 pav. Organinio (O) fosforo, neorganinio (N) fosforo ir judriojo fosforo (P_2O_5) (mg kg^{-1}) kiekių pasiskirstymas skirtingose šlaito dalyse.....	32
18 pav. Organinio (O) fosforo ir neorganinio (N) fosforo (mg kg^{-1}) kiekių pasiskirstymas kalvos šlaito dirvožemio skirtingo dydžio agregatuose.....	34
19 pav. Dirvožemio agregatų dydis (d) skirtingo statumo šlaituose, 2019 m.....	35

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Tyrimo vietų charakteristikos.....	20
2 lentelė. Fosfatų (PO_4) netekimas su vandens nuotėkiu nuo skirtingo statumo šlaitų, taikant skirtingas agropriemonės 2019 m.....	29
3 lentelė. Kalvos šlaitu nuplauto dirvožemio granulimetrinė sudėtis 2019 m.....	30
4 lentelė. Judriojo fosforo (P_2O_5) nuostoliai su kalvos šlaitu nuplautu dirvožemiu 2019 m.....	30
5 lentelė. Dirvožemio granulimetrinė sudėtis (viršutinio armens sluoksnio 0–5 cm) atskirose skirtingo statumo šlaitų dalyse lauko augalų sėjomainoje 2019 m.....	33
6 lentelė. Dirvožemio cheminės savybės ir vandenyje patvarių agregatų kiekis atskirose skirtingo statumo šlaitų dalyse, lauko augalų sėjomainoje 2019 m.....	33
7 lentelė. Dirvožemio C_{org} ir patvarių agregatų $> 0,25$ mm kiekis atskirose skirtingo statumo šlaitų dalyse taikant skirtingo intensyvumo agropriemonės, 2019 m.....	36

SUTRUMPINIMAI

P – fosforas

Olsen-P – augalams prieinama fosforo forma

Ca₂-P – dikalcio fosfatas

Al-P – aliuminio fosfatai

Fe-P – geležies fosfatai

O-Al-P – fosforas surištas su aliuminio oksidais

Fe³⁺ – trivalentė geležis

Fe²⁺ – divalentė geležis

N ir P_i – neorganinis fosforas

O ir P_o – organinis fosforas

LSD – mažiausias reikšmingas skirtumas

P – tikimybės lygis

TURINYS

ĮVADAS.....	3
1. PROBLEMA IR JOS IŠTIRTUMAS	5
1. 1. Fosforo reikšmė, šaltiniai ir transformacija dirvožemyje bei vandenyje	5
1. 2. Gamtinių ir antropogeninių veiksnių įtaka fosforo junginių kitimui dirvožemyje	10
1. 3. Erozijos reikšmė fosforo junginių pokyčiams sistemoje dirvožemis-vanduo	13
1. 4. Dirvožemio erozijos tyrimai Lietuvoje.....	15
2. TYRIMŲ VIETA, OBJEKTAS IR METODIKA.....	18
3. TYRIMŲ REZULTATAI	25
3. 1. Kalvos šlaito ypatumų ir klimatinių sąlygų įtaka fosforo junginių netekimui iš dirvožemio: archyvinių duomenų analizė	25
3. 2. Fosforo junginių netekimas iš dirvožemio priklausomai nuo nuotėkio, šlaito statumo ir taikytų agropriemonių.....	28
3. 3. Fosforo junginių pasiskirstymas atskirų šlaito dalių dirvožemyje ir skirtingo dydžio agregatuose lauko augalų sėjomainoje.....	31
REZULTATŲ APTARIMAS.....	37
IŠVADOS	39
LITERATŪROS SĄRAŠAS	40
PRIEDAI	47

IVADAS

Kalvotame reljefe paviršinis nuotėkis yra pagrindinis veiksnys, dėl kurio intensyvėja vandenu eutrofikacija, o dirvožemio viršutiniuose sluoksniuose iki 70–90 % netenkama bendrojo fosforo (Kleinman et al., 2011). Literatūriniais duomenimis nustatyta, kad dirvožemio erozija ir bendrojo fosforo nuostoliai yra glaudžiai susiję su kalvos šlaito nuolydžiu ir augalinės dangos pobūdžiu bei fosforo junginių forma. Fosforas dirvožemyje randamas daugelyje kompleksinių formų, kurios ženkliai skiriasi savo elgesiu, judrumu ir atsparumu biologiniam prieinamumui. Todėl dirvožemio fosforo pokyčiai, priklausomai nuo jo formų, yra labai skirtingi. Dirvožemio Olsen-P ($\text{Ca}_2\text{-P}$; Al-P) formos laikomos augalams prieinomis ir plačiai naudojamos vertinant fosforo įsisavinimą agroekosistemoje. Dominuojanti bendrojo fosforo forma nuotėkų vandenyje yra neorganinis kietųjų dalelių fosforas. Tirpus organinis fosforas nors ir sudaro tik mažą kiekį bendrojo fosforo esančio nuotėkose, tačiau tai yra potencialas išsiplauti fosforą į paviršinius vandenis, nes tai labai judri forma, kuri, palyginus su neorganiniu fosforu, yra silpniau fiksuojama neorganinių dirvožemio mineralų (McDowell et al., 1994, Li et al., 2017).

McDowell ir kt. (1994) nurodo, kad nuotėkio vanduo laikomas užterštu (degraduotu), kai jame bendrojo fosforo koncentracija siekia $0,10 \text{ mg l}^{-1}$ (Li et al., 2017). Ilgalaikiai stebėjimai Baltijos jūros šalyse (Estija, Latvija ir Lietuva) nurodo, kad vidutiniai metiniai fosforo junginių nuostoliai iš žemės ūkio baseinų gali siekti nuo $0,12$ iki $0,42 \text{ kg ha}^{-1}$ (Bučienė et al., 2019). Įvairių fosforo frakcijų ir formų išskyrimas ir vertinimas yra efektyvus būdas ne tik vertinant fosforo prieinamumą augalams ir jo transformacijas, bet taip pat suteikia informaciją vertinant dirvožemio fosforą, kaip potencialų šaltinį vandens telkinių eutrofikacijos procesui. Nuotėkų kiekis, nuosėdų koncentracija jose, o taip pat netenkamas iš dirvožemio fosforo kiekis labai priklauso nuo kritulių kiekio, jų pobūdžio ir dirvožemio paviršiaus uždengimo augalais. Daugiausia bendrojo fosforo iš dirvožemio (su vandeniu ir nuosėdomis) netenkama su liūtiniais krituliais augalų vegetacijos pradžioje, kai dirvožemio paviršius nepilnai padengtas augalais. O bendrojo fosforo išplovimas teigiamai koreliuoja su dirvožemyje esančiu $\text{P}_2\text{O}_5\text{-AL}$ (Bučienė et al., 2007, Li et al., 2017).

Efektyviausia priemonė mažinanti nuotėkį šlaite, o kartu ir fosforo migraciją į paviršinius vandenis yra augalinė danga, o dažniausiai tai ilgalaikis žolynas. Šiuo aplinkosauginiu požiūriu mažiau efektyvios yra įvairaus tipo sėjomainos. Fosforo praradimas nuotėkio metu kinta erdvės ir laiko atžvilgiu priklausomai ne tik nuo kritulių intensyvumo, bet ir vietovės sąlygų, tokių kaip dirvožemio mineraloginės ir granulimetrinės sudėties. Kontroliuojant fosforo praradimą dėl nuotėkio svarbų vaidmenį atlieka augalų šaknų sistema, kuri ne tik sutankina dirvožemį, bet ir pagerina dirvožemio

agregatų surišimą, jų patvarumą vandens poveikiui, o kartu pagerina vandens infiltraciją į dirvožemio paviršinį sluoksnį, taip sumažinant jo nutekėjimą šlaitu žemyn. Visa tai rodo, kokią svarbią reikšmę išsaugant fosforą dirvožemyje turi šlaito dirvožemio agregatų patvarumas ir maistinių elementų pasiskirstymas šiuose agregatuose (Thi Bich Thao et al., 2008, Bogužas ir kt., 2013, Veršulienė, 2017, Li et al., 2017). Kadangi dirvožemio agregatai atlieka svarbų vaidmenį dirvožemio fizikocheminiuose ir biologiniuose procesuose, tai daro įtaką ir fosforo junginių formoms, jų kiekiams, prieinamumo augalams ir jo nusiplovimo šlaitu galimybėms. Wright (2009) nustatė, kad didžioji dalis judraus fosforo (Fe-P, Al-P ir Ca-P) yra susitelkusi smulkiausiuose dirvožemio agregatuose (<0,053 mm), o huminių-fulvinių rūgščių fosforo daugiau nustatyta >0,25 mm agregatuose. Tuo tarpu kituose tyrimuose nustatyta, kad augalams prieinamo neorganinio fosforo daugiau rasta agregatuose >1,0 mm ir <0,25 mm, negu 0,25–1,0 mm agregatų frakcijoje. Siekiant įvertinti fosforo formų pokyčius gamtinių ir antropogeninių veiksnių įtakoje reikalingi tyrimai konkrečioje gamtinėje aplinkoje (Wang et al., 2001).

Darbo tikslas – įvertinti priešerozinių požiūriu skirtingų agropriemonių (javų su juoduoju pūdymu ir ilgalaikio žolyno) įtaką fosforo junginių kitimui sistemoje dirvožemis-vanduo.

Darbo tikslui įgyvendinti buvo išskirti šie **uždaviniai**:

1. įvertinti fosforo junginių pokyčius kalvoto reljefo dirvožemiuose ir jų nusiplovimo intensyvumą, priklausomai nuo taikytų agropriemonių ir klimatinių sąlygų (archyvinių duomenų analizė);
2. įvertinti fosforo junginių pokyčius dirvožemyje ir jų nuostolius su vandens bei dirvožemio nuotėkiu, priklausomai nuo kalvos šlaito statumo ir taikytų agropriemonių;
3. nustatyti fosforo junginių pasiskirstymą atskirų šlaito dalių dirvožemyje ir skirtingo dydžio agregatuose intensyvioje javų su juoduoju pūdymu sėjomainoje ir teoriškai pagrįsti fosforo junginių išsaugojimo galimybes kalvoto reljefo dirvožemiuose.

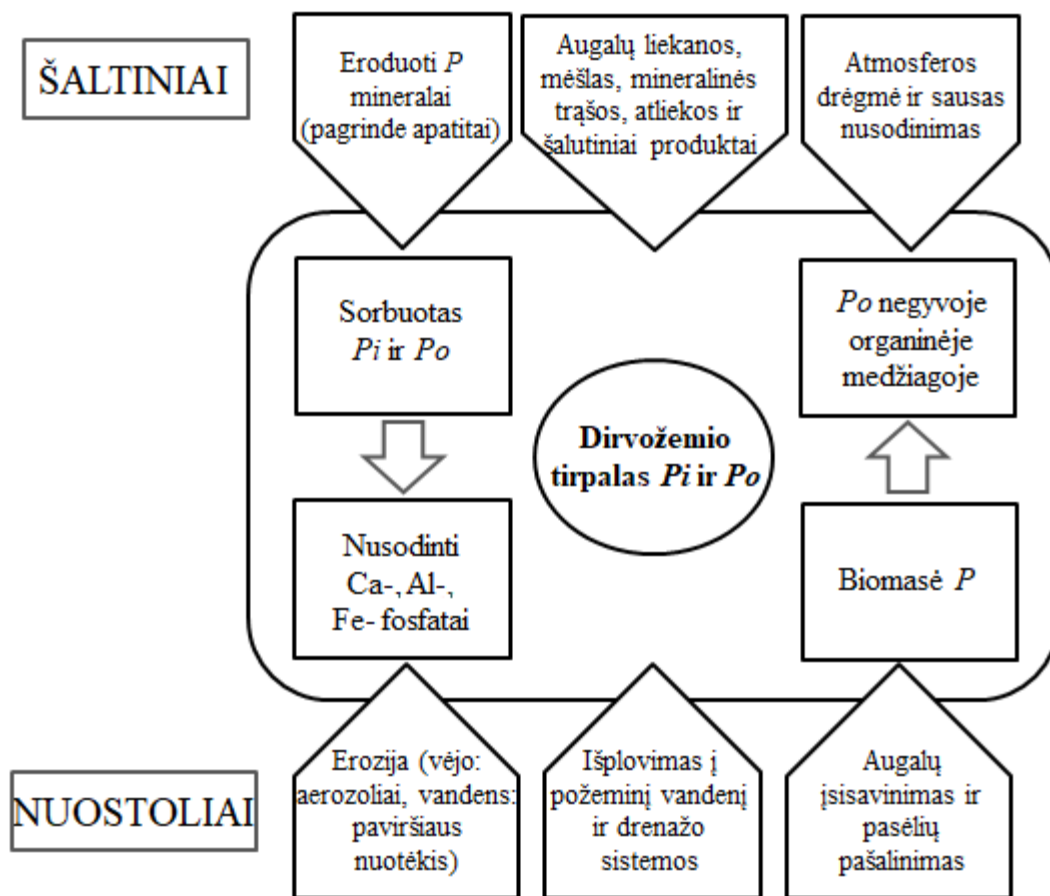
Darbo naujumas – įvertintas įvairių fosforo junginių kitimas dirvožemyje, priklausomai nuo šlaito statumo ir granulometrinės sudėties. Taip pat nustatytas fosforo junginių pasiskirstymas dirvožemyje atskirose šlaito dalyse ir skirtingų o dydžio agregatų frakcijose. Gauti fosforo junginių pokyčiai dirvožemyje susieti su jų nuostoliais nuotėkio metu. Gauti duomenys prisideda prie fosforo junginių valdymo kalvoto reljefo dirvožemiuose ir jų patekimo į paviršinius vandenis. Fosforo junginių tyrimai Lietuvoje yra atliekami Kaltinėnų bandymų stotyje (Vėžaičių filialas, Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centras). Tačiau detalesniam pažvelgimui į fosforo junginių pasiskirstymą šlaito dalyse ir skirtingo dydžio agregatuose tyrimai vykdyti Lietuvoje nebuvo. Europoje tokius ir panašius tyrimus atlieka įvairūs Kinijos, Indonezijos, Brazilijos ir kt. mokslininkai.

1. PROBLEMA IR JOS IŠTIRTUMAS

1. 1. Fosforo reikšmė, šaltiniai ir transformacija dirvožemyje bei vandenyje

Fosforas yra vienas pagrindinių augalų mitybos elementų dirvožemyje. Nors augaluose jo yra mažiau nei azoto, kalio ar kalcio, jis, kaip derlių lemiantis veiksnys, yra svarbesnis nei kalcis ar kalis. Fosforo kiekis dirvožemyje yra palyginti pastovus ir jis taip greitai ir lengvai nekinta (Mažvila, 1998). Tačiau dėl didelio pastovumo ir mažo tirpumo fosforas augalams dažnai tampa trūkstamu elementu. Šiuolaikinis žemės ūkis be jo neįsivaizduojamas, nes gyvulių pašarams ir trąšoms naudojamo fosforo neįmanoma pakeisti jokiais kitomis medžiagomis. Fosforo ciklas prasideda nuo uolienuų dūlėjimo, iš ten fosforo junginiai patenka į producentus ir įsijungia į medžiagų apytaką (*1 pav.*). Iš negyvųjų organizmų fosforas grįžta į aplinką, tačiau dalelė jo yra netenkama, nes su nuotėkiu patenka į vandens telkinius ir nusėda dugne. Dalis, kuri nusėda vandenynuose ir jūrose, neišvengiamai dingsta iš fosforo apytakos rato, kol įvyksiančių geologinių procesų metu fosforo junginiai vėl gali patekti į sausumos uolienas. Vulkanų pelenai, aerozoliai, mineralinės dulkės, galvijų mėšlas, mineralinės fosforo trąšos taip pat reikšmingas fosforo šaltinis. Tai, kad fosforas eikvojamas ir jo netenkama kiekviename gyvavimo ciklo etape, didina susirūpinimą dėl fosforo atsargų ateityje ir vandenų bei dirvožemio taršos – tiek Europos Sąjungoje, tiek ir visame pasaulyje (Europos komisija, 2013; Falconer, 2014). Priešingai kai kurioms neorganinėms azoto formoms, kurios dirvožemyje yra nepastovios, lengvai mineralėja ar išsiplauna bei pasipildo, fosforas yra palyginti pastovus, o jo šaltinis dirvožemyje yra tik mineralai ir organinėje medžiagoje esantys fosforo junginiai (Gūžys, Petrokienė, 2006).

Fosforas dirvožemyje yra organiniuose ir neorganiniuose junginiuose. Šios fosforo formos dirvožemyje skiriasi skirtingomis išsiskyrimo ypatybėmis, stabilumu ir biologinio prieinamumo laipsniais. Neorganinis fosforas paprastai sudaro 35–70% viso dirvožemio fosforo. Jis ortofosfatų pavidalu yra pagrindinė daugumos fosforo trąšų sudedamoji dalis. Jei ortofosfatas įnešamas į dirvožemį, jis išskaidomas į formas, kurios iš karto nėra augalams prieinamos. Organinis fosforas paprastai sudaro 30–65% viso dirvožemio fosforo kiekio. Jis gali išsiskirti per mineralizacijos procesus, kuriuos lemia dirvožemio mikroorganizmai ir augalų šaknys. Organinis fosforas augalams pasiekiamas tik tada, kai skaidoma organinė medžiaga. Didesnė viso fosforo dalis paverčiama mažiau tirpiomis fosforo formomis bei frakcijomis ir tampa neprieinama arba mažai prieinama augalams. (Jokubauskaitė ir kt., 2015).



1 pav. Fosforo (P) ciklo schema dirvožemyje (Kruse et al., 2015)

Pagal prieinamumą augalams, dirvožemyje išskiriamos trys funkcinės neorganinio (P_i) ir organinio fosforo (P_o) frakcijos – tai lengvai labilios, vidutiniškai labilios ir stabilios (Zheng, Zhang, 2012). Yra žinoma, jog mikroorganizmai sukelia daugybę fosforo junginių transformacijų: neorganinių fosforo junginių tirpumo pokyčius; organinių fosfatų junginių mineralizavimo į neorganinius; imobilizacijos procesą; neorganinių fosforo junginių oksidaciją arba redukciją. Fosforo junginių mineralizacija ir imobilizacija yra svarbiausios fosforo ciklo reakcijos (Choudhary et al., 2017). Taip pat yra gausu inovatyvių produktų, t. y. biologinių trąšų, savo sudėtyje turinčių bakterijų, kurios patekusios į dirvožemį atpalaiduoja fosforą iš neprieinamų augalams formų, tokių kaip kalcio, geležies ir aliuminio fosfatų, ir paverčia juos augalams prieinamomis formomis. Moksliniais tyrimais įrodyta, kad jau praėjus mėnesiui po tokių preparatų įterpimo, augalams prieinamo fosforo dirvožemyje padaugėjo 22 %, o po dviejų mėnesių – 31 %, palyginus su kiekiu buvusiu prieš preparato naudojimą (Jakienė, Spruogis, 2015; Jodaugienė, 2017).

Dirvožemyje taip pat vyksta sudėtingi fosforo dinamikos procesai, kuriuos sudaro neorganinio ir organinio fosforo junginių pasiskirstymas tarp dirvožemio kietosios dalies ir tirpalo, organinio fosforo mineralizacija ir neorganinio mobilizacija, neorganinio ir organinio fosforo junginių migracija dirvožemyje (išsiplovimas) ir neorganinio fosforo apykaita, priklausomai nuo augalų šaknų ir mikroorganizmų aktyvumo (Mažvila ir kt., 2005). Žemės ūkio augalai geriausiai ir lengviausiai įsisavina fosforą, esantį dirvožemio tirpale, o fosfatus, absorbuotus kietosios dirvožemio dalies dalelių paviršiuje ir vadinamus judriuoju fosforu, gali naudoti ilgą laiką (Vaišvila ir kt., 2002).

Judriojo fosforo formos kiekio atžvilgiu Lietuvos dirvožemiai suskirstyti į šias grupes: labai mažo fosforingumo (iki 50 mg/kg) dirvožemių – 6,4 %, mažo (51–100 mg/kg) – 35 %, vidutinio (101–150 mg/kg) – 28,7 % bei pakankamo (> 150 mg/kg) – 29,9 %. Daugiausia judriojo fosforo yra Vidurio Lietuvos rudžemiuose, palvažemiuose, kuriuose intensyviai ūkininkaujama, nemaža dalis plotų yra pakankamai tręšiami fosforo trąšomis. Mažiausiai judriojo fosforo yra Vakarų Lietuvos balkšvažemiuose ir išplautžemiuose, tam ne mažą įtaką turi menkesnis tręšimas bei didėjantis rūgštingumas (Mažvila, Adomaitis, 2005). Fosforo junginių nuplovimas ir išplovimas iš dirvožemio yra vieni iš daugelio šių maistmedžiagių patekimo į paviršinius vandenis šaltinių.

Biogenų perteklius vandens telkinyje sukelia natūraliomis sąlygomis nebūdingą pernelyg spartų augalų ir kitų organizmų vystymąsi. Tai, savo ruožtu, lemia vandens masės fizinių ir cheminių savybių kaitą, skatina vandens telkinių uždumblėjimą, biotope kaitą ir rekreacinių išteklių sumažėjimą. Agrariniame kraštovaizdyje, nesant reikšmingos taškinės taršos, dažniausiai eutrofikaciją ribojantis biogenas yra fosforas. Dėl jo stokos intensyvios ir nedarnios žemdirbystės laikotarpio pabaigoje – per paskutinį XX a. dešimtmetį azoto perteklių turinčiuose vandens telkiniuose eutrofikacijos procesai stabilizavosi, tačiau telkiniuose, kur yra fosforo perteklius, šie procesai tęsiasi (Taminskas ir kt., 2006). Į paviršinius vandenis fosforas patenka iš įvairių šaltinių: suplaunamas iš dirvų, išpustomas iš uolienu, išskiriamas kaip vandens organizmų gyvybinės veiklos bei irimo produktas (Grubliauskas, Bradulienė, 2018), o taip pat dėl nuotėkio iš labai mažo miškingumo su gausiomis melioravimo sistemomis esančių taškinių objektų (Taminskas ir kt., 2006), iš organinių atliekų nuotekose ir pramoninių nuotekų (Mueller, Helsel, 1996), iš ploviklių ir skalbiklių, iš maisto ir vaistų pramonės bei nutekėjimų audrų metu (Van Rossum, 2015). Tačiau fosforo pagausėjimas paviršiniuose vandens telkiniuose daugiausia susijęs su nesubalansuotu tręšimu arba trąšų plovimu eroduojamose žemėse.

Didžiausia fosforo transportavimo rizika vandens telkiniui atsiranda tada, kai didelis fosforo šaltinis turi gerą hidrologinį ryšį su paviršiniais vandenimis. Tokios sritys yra žinomos kaip kritinės šaltinių sritys (Ulen et al., 2012). Fosforo transportavimas iš dirvožemio į paviršinius vandenis vyksta

įvairiomis formomis. Kai fosforas įterpiamas į dirvožemį, cheminiais, fiziniais ir biologiniais procesais vyksta sudėtingas skirtingų frakcijų ir formų susilieėjimas. Paprastai dirvožemio fosforo telkiniuose su skirtingomis frakcijoms ir formomis dominuoja neorganinis fosforas, o didesnė trąšų norma paprastai padidina Olsen-P ($\text{Ca}_2\text{-P}$, Al-P), Fe-P, O-Al-P ir Org-P, palyginti su mažesne trąšų norma. Nuotėkio bendrojo ir kietųjų dalelių fosforo daugiausia buvo gauti iš Olsen-P frakcijų dirvožemyje. Al-P frakcija parodo didžiausią prieinamumą augalams, todėl dirvožemio neorganinio fosforo frakcijos taip pat prisideda prie fosforo praradimo nuotėkio metu. Dirvožemyje $\text{Ca}_2\text{-P}$ yra frakcija, kurią renkasi pasėliai, ir tai gali paaiškinti, kodėl ji nėra glaudžiai susijusi su fosforo koncentracija nuotėkio vandenyje. Tuo tarpu O-Al-P yra mažiau judrus, palyginti su kitomis turimomis neorganinio fosforo frakcijomis. Šiuo atžvilgiu O-Al-P susidarymas gali padėti sumažinti fosforo nuotėkį tiekiant fosforą pasėliams (Hassan, 2013; Oram, 2014, Li et al, 2018). Yra nustatyta, jog fosforo junginių nuostoliai pagrįdė vyksta su dirvožemio nutekėjimu, o ištirpęs organinis fosforas atlieka svarbų vaidmenį fosforo transporte dirvožemyje. Kadangi dirvožemyje ištirpęs organinis fosforas yra judresnis nei ortofosfatai, jis gali greičiau pasiekti paviršinius vandenis (Verheyen et al., 2015; Orenda Technologies, 2017, Li et al, 2018).

Fosfatai vandenyje egzistuoja tokiose formose, kaip metafosfatai (arba polifosfatai) ir organiškai susieti fosfatai. Polimerinės formos naudojamos katilinių vandenims ir plovikliams valyti. Vandenyje jie transformuojami į ortofosfatus ir yra prieinami augalams. Organiniai fosfatai yra surišti arba susieti su augalų audiniais, kietosiomis medžiagomis arba kitomis organinėmis medžiagomis. Po skilimo šie fosfatai taip pat gali būti paversti ortofosfatais (Hassan, 2013; Oram, 2014), kurie dažniausiai prisideda prie vandens telkinių eutrofikacijos. Fosforo junginių nuostolių dydis priklauso ir nuo dirvožemio agregatų dydžio. Nustatyta, kad fosforo junginių desorbcija yra didesnė nuo 4 iki 6 mm agregatuose, negu mažesnėse, o fosforo junginių desorbcija išplovimo būdu yra, atvirkščiai, didesnė mažesniuose agregatuose (<0,5 mm) (Wang et al., 2001).

Fosforas naudojamas esant didesniam pasėlių kiekiui, jis gali susidaryti dirvožemyje ir būti išleidžiamas į vandens telkinius nuotėkio metu. Iširta, jog fosforas yra pripažintas svarbiausiu vandens eutrofikacijos stimulatoriumi, o žemės ūkis laikomas pagrindiniu fosforo teršimo šaltiniu paviršiniuose vandenyse visame pasaulyje (Li et al., 2017). Mokslininkų darbuose (Klimaitė, Tamošaitis, 1980; Mekonnen, Hoekstra, 2017; Povilaitis, 2004, 2006; Taminskas ir kt., 2006) minima eutrofikacija yra vienas labiausiai pastaruoju metu vykštąs procesas, kurio neigiamos pasekmės pasireiškia ežerų savybių pasikeitimu: vandens skaidrumo sumažėjimu, deguonies deficitu priedugniniame vandens sluoksnyje, vandens žydėjimu, masiniu kai kurių planktoninių dumblių rūšių išplitimu, sparčiu

pakraščių užaugimu vandens augalija, padidėjusiu nuosėdų kaupimusi ir t. t., o galiausiai dvokiančio vandens kvapo atsiradimu ir jo netinkamumu naudojimui, žmonėms kyla pavojus užsikrėsti įvairiomis ligomis. Šiuo metu jau gerai žinomi pagrindiniai antropogeninės eutrofikacijos veiksniai: fosforas (kaip pagrindinis limituojantis biogeninis elementas), azotas bei kiti cheminiai ir biologiniai eutrofikacijos proceso rodikliai.

Remiantis naujausiais tyrimais (2017), žmogaus sukurta fosforo teršalų koncentracija gėlųjų vandenu baseinuose visame pasaulyje yra pavojinga. Naujajame „American Geophysical Union“ žurnale („Amerikos geofizinė sąjunga“) „Water Resources Research“ („Vandens išteklių tyrimai“) paskelbtame tyrime nustatytas bendras žmogaus veiklos kiekis fosforo, kuris pateko į gėlųjų vandenu telkinius nuo 2002 m. iki 2010 m. Naujojo tyrimo rezultatai rodo, kad pasaulinė žmogaus veikla per metus išleidžia 1,62 mln. tonų fosforo į pagrindinius gėlo vandens telkinius. Kinija prisidėjo 30 % gėlo vandens fosforo apkrovos, Indija 8 %, o JAV – 7 %. Tyrime taip pat buvo nustatyta, ar žmogaus veikla viršijo Žemės gebėjimą atskiesti ir įsisavinti fosforo perteklių gėlo vandens telkiniuose. Autoriai nustatė, kad fosforo apkrova viršija gėlo vandens telkinių asimiliacijos pajėgumą 38 % žemės paviršiaus, kuriame gyvena 90 % pasaulio gyventojų. Žemės ūkio įnašas į pasaulinę fosforo apkrovą siekė 38 % (iš buitinių nuotekų – 54 %, iš pramonės – 8 %). Autoriai taip pat nustatė, kad fosforo kiekis žemės ūkyje tyrimo laikotarpiu išaugo 27 %, nuo 579 000 tonų 2002 m. iki 734 000 tonų 2010 m. Labiausiai užterštos gėlo vandens zonos yra Aralo drenažo baseinas, Huanghè (Geltonoji) upė Kinijoje, Indo ir Gango upės Indijoje ir Dunojaus upė Europoje. Pagal naująjį tyrimą mažiau apgyvendinti regionai, tokie kaip Australija ir Šiaurės Afrika, taip pat kenčia dėl didelio vandens taršos lygio. Šie regionai turi mažesnes fosforo apkrovas, palyginti su tokiomis vietovėmis kaip Kinija ir Europa, tačiau jie turi daug mažiau vandens, kad galėtų laikyti jų perteklinį fosforą (Mekonnen, Hoekstra, 2017).

Europoje maistinių medžiagų, eksportuojamų iš upių į pakrantės vandenį, kiekis, taip pat taikomų švelninimo priemonių poveikis yra žinomas tik iš dalies, be nuoseklaus laiko ir erdvės nuorodų. Per pastaruosius 20 metų, Europa eksportavo 4,1–4,8⁹ kg/m azoto bei 0,2–0,3⁹ kg/m fosforo į pakrantės vandenį. Be Šiaurės jūros ir Baltijos jūros dalies, metinis maistinių medžiagų eksportas labai nepasikeitė, nepaisant priemonių, skirtų maistinių medžiagų mažinimui, ir kad azoto, fosforo santykis nuolat didėjo, ypač Šiaurės ir Viduržemio jūrose (Grizzetti et al., 2012). Neseniai buvo pasiūlyta įgyvendinti nuoseklų maistinių medžiagų valdymo strategijų ir priemonių paketą: 5R strategiją. Šia strategija siekiama uždaryti fosforo ciklą Europoje. Strategijos principas: pertvarkyti fosforo

patekimus, sumažinti fosforo nuostolius vandenyje, perdirbti fosforą biologiniuose ištekliuose, atkurti fosforą iš atliekų ir, jei reikia, iš naujo apibrėžti naują maisto sistemą (Schoumans et al., 2015).

Ne mažesnė problema vyrauja Kuršių mariose bei Baltijos jūroje. Kuršių marių ekosistemos būklė labai priklauso nuo teršalų apkrovų prietakos iš upių baseinų, kurių pagrindinis yra Nemuno upės baseinas. Fosforo prietaka yra svarbi dėl tiesioginės įtakos toksinių melsvadumблиų gausėjimo Kuršių mariose. Aplinkos apsaugos agentūros duomenimis, paviršinių vandens telkinių užterštumo pokyčiai 1998–2010 m. laikotarpiu nurodo, kad bendrojo fosforo kiekiai patenkantys į Kuršių marias nuolat mažėjo. Tai yra susiję su pagerėjusiu miesto nuotekų išvalymu. Lyginant 2010 m. ir 1998 m., bendrojo fosforo teršalų išleidimas į paviršinius vandenį sumažėjo 4,7 karto (Arustienė ir kt., 2011). Anksčiau buvęs švarus Baltijos jūros vanduo per paskutinį šimtmetį tapo stipriai eutrofikuoatas, perpildytas maistingomis medžiagomis. Tai rimta problema ne tik jūros ekosistemai bet ir Pabalčio gyventojams. Dėl žmonių ūkinės veiklos natūralus azoto ir fosforo kiekis Baltijos jūroje smarkiai padidėjo. Dabar jūra turi keturis kartus didesnę azoto ir aštuonis kartus didesnę fosforo kiekį, lyginant su 1900 metais, o pakrantės vandenys žydi 30-40 kartų dažniau nei XX a. pradžioje. Apie 80 % maistinių medžiagų į Baltijos jūrą suteka upėmis ir tiesiogiai iš supančių teritorijų. Pagrindiniai maistinių medžiagų šaltiniai yra žemės ūkis ir buitiniai nutekamieji vandenys. Nors maistinių medžiagų prietaka į Baltijos jūrą paskutiniaisiais metais šiek tiek sumažėjo, tačiau eutrofikacijos proceso atžvilgiu teigiamų pokyčių nėra. Apie 40 % į Baltijos jūrą sutekančio fosforo ir 60 % azoto patenka dėl žemės ūkio veiklos (Lietuvos gamtos fondas, 2019; Ulen et al., 2012).

1. 2. Gamtinių ir antropogeninių veiksnių įtaka fosforo junginių kitimui dirvožemyje

Fosforo savybės dirvožemyje priklauso nuo daugybės gamtinių ir antropogeninių veiksnių įtakos, tokių kaip klimatinės sąlygos, dirvožemio temperatūra ir drėgmė, reljefas, augalija, žemės dirbimas, dirvožemio pH ir organinės medžiagos kiekis bei kt. Fosforo prieinamumas dirvožemyje yra labai sudėtingas, todėl turi būti sistemingai vertinamas, nes tai yra susiję su fosforo dinamika ir transformacija tarp įvairių fosforo baseinų (Jokubauskaitė ir kt., 2015).

Dirvožemio grupė ir granulimetrinė sudėtis. Turint omeny fosforo sulaikymą dirvožemyje, užsienio mokslininkų straipsniuose ir moksliniuose darbuose (Sardi, Csatho, 2002; Malav et al., 2015; Jeschke, 2017) teigiama, jog molinguose dirvožemiuose fosforo fiksacija didėja didėjant molio kiekiui, t. y. padidėjus molio kiekiui dirvožemyje, padidėja sorbcijos pajėgumas, nes molio dalelės turi didelį paviršiaus plotą, kuriame gali vykti fosfatų sorbcija. Fosforo formų koncentracija dirvožemyje skiriasi

nuo tekstūros klasės frakcijos. Yra ištirta, jog dirvožemio tekstūra gali pakeisti fosforo pusiausvyrą ir prieinamumą dėl savo poveikio fosforo sorbcijos-desorbcijos-difuzijos procesams bei organinių medžiagų mineralizacijai dirvožemyje. Moksliniais tyrimais nustatyta, jog didesnė fosforo koncentracija būna smulkiose (molio ir dumblo) frakcijose nei stambių dulkių ir smėlio frakcijose (Uzoho, 2018).

Klimatinės sąlygos, dirvožemio temperatūra bei drėgmė. Klimato įtaka yra svarbi fosforo junginių dinamikai dirvožemyje. Tokios sąlygos kaip temperatūra, drėgmė, dirvožemio aeravimas (deguonies kiekis) ir druskingumas gali paveikti fosforo mineralizacijos greitį organinių medžiagų skilimo metu. Organinės medžiagos skaidosi išskirdamos fosforą sparčiau drėgnoje klimato aplinkoje, o vėsioje sausoje – lėčiau. Taip pat fosforas išsiskiria greičiau, kai dirvožemis yra gerai aeruotas, nei tada, kai jis yra sutankėjęs ar prisotintas vandens (Jeschke, 2017). Temperatūra ir drėgmė yra svarbūs veiksniai, turintys įtakos absorbcijai, transformacijai ir dirvožemio fosforo prieinamumui augalams (Song et al., 2012). Ištirta, kad tręštame dirvožemyje fosforo desorbcijos pajėgumas didėja didėjant temperatūrai (Sheppard, Racz, 1984), o žemas dirvožemio temperatūros ir drėgmės kiekis padidina fosforo kiekį dirvožemyje, ir atvirkščiai (Song et al., 2012).

Reljefas. Dirvožemis kalvos apačioje turi didesnę drėgmės kiekį nei viršuje, todėl jis greičiau prisotina ir sukelia didesnę nuotėkio tūrį. Kai dirvožemio profilis yra prisotintas, tirpios maistinės medžiagos, tame tarpe ir fosforas, yra lengviau transportuojamos, o vanduo teka požeminio srauto šoniniu būdu arba, jei dirvožemio profilis yra visiškai prisotintas, kaip nuotėkis. Dėl šių veiksnių maistinių medžiagų judėjimo potencialas prisotintuose dirvožemiuose yra didesnis (Easton, Petrovic, 2005). Fosforo junginių dinamika priklauso ne tik nuo reljefo nuolydžio, bet ir nuo nuolydžio ilgio bei jo gradiento. Šlaito ilgis turi įtakos dirvožemio maistinių medžiagų nuostoliams tose vietose, kur vyksta erozija dėl smarkių kritulių. Šlaito gradientas daro įtaką maistinių medžiagų praradimui nuotėkio srautu ir greičiu šlaitu. Sumažėjus šlaito nuolydžiui dėl infiltracijos padidėjimo sumažėja maistinių medžiagų nuostoliai (Li et al., 2006).

Kalkinimas ir tręšimas. Kalkinimas gerina rūgščių dirvožemių savybes, augalų mitybos sąlygas ir aprūpina augalus baziniais maisto elementais – kalciu ir magniu. Jo įtakoje pagerėja augalų aprūpinimas pagrindinėmis maisto medžiagomis, ypač azotu, fosforu ir kaliu, o taip pat ir kai kuriais mikroelementais. Kalkinimas neutralizuoja augalams kenksmingą daugelio naudojamų mineralinių trąšų ir rūgščių kritulių rūgštingumą, padidina augalų atsparumą žiemojimui ir dirvožemio atsparumą erozijai. O svarbiausia, jog augalams įsisavinus daugiau maistingųjų medžiagų, mažiau jų išplaunama į gruntinius vandenis (Jankauskas, 1989). Efektyviausias būdas praturtinti dirvožemį organinėmis

medžiagomis – tręšimas organinėmis trąšomis. Mėšlo teigiama įtaka augalų derliui ir dirvožemio derlingumui labai ryški. Tręšiant šiaudų mėšlu, kuris yra turtingesnis fosforo kiekiu, labiau padidina šio elemento kiekį dirvožemyje. Fosforo išplovimas nuo tręšimo nesikeičia ir laikoma, kad fosforo migracija dirvožemio profilyje padidėja, kai tręšiama kiaulių mėšlu, kadangi jame yra nemažai fosforo ir jis yra judriuose organiniuose junginiuose (Tripolskaja, 1994). Tačiau ilgalaikis dirvožemių tręšimas mėšlu suaktyvina organinio fosforo migraciją iki 80–100 cm gylio ir gali skatinti vandens telkinių eutrofikacijos procesą. Augalų tręšimas mineralinėmis trąšomis gali iš esmės lemti cheminių elementų migracijos procesus dirvožemyje, nes su jais į dirvožemį patenka tirpūs biogeniniai ir kiti elementai. Nors fosfatų migracijos nuostoliai nėra dideli, tačiau ilgą laiką tręšiant dideliu kiekiu fosforo, susidaręs fosforo junginių perteklius yra išplaunamas į gilesnius dirvožemio sluoksnius. Patekęs į gruntinį ir paviršinius vandenis, jis neigiamai veikia visą ekosistemą (Adomaitis, Tripolskaja, 2010).

Žemės dirbimas. Žemės naudojimo pokyčiai ir auginimo intensyvumas yra pagrindiniai šio amžiaus globaliniai pokyčiai. Tai daugiausia vyksta dėl pasaulinio masto maisto, pašarų, pluošto ir biokuro poreikio, kurį lemia gyventojų skaičiaus augimas. Žemės paskirties keitimas žymiai keičia fizines, chemines ir biologines dirvožemio savybes, veikia jo derlingumą bei didina eroziją. Fosforas yra pagrindinė maistinė medžiaga, dėl kurios reikia atsižvelgti į Žemės naudojimo pokyčius. Tai turi įtakos fosforo prieinamumui augalų įsisavinimui arba padidinant fosforo nuostolius, arba paverčiant juos labiau nepalankesniais baseiniais (Maranguit et al., 2017, Liu et al., 2018). Prieinama fosforo frakcija yra svarbus parametras matuojant ateities fosforo pakrovimą. Todėl ilgalaikė fosforo elgsena, skatinanti vandens telkinių eutrofikaciją, gali būti efektyviau įvertinta remiantis skirtingomis fosforo frakcijomis nei bendru fosforo kiekiu. Labilus fosforas, įskaitant labilų neorganinį fosforą, labilų organinį fosforą, absorbuoti ant nuosėdų koloidų ir kalcio karbonato, yra biologiškai preinama fosforo frakcija ir laikoma rodikliu, kuriuo įvertinamas fosforo tiekimas augalams. Redokso jautrus geležies-aliuminio sujungtas fosforas gali būti pakeistas į biologiškai prieinamą fosforo frakciją anoksinėmis sąlygomis, sumažinus Fe^{3+} į Fe^{2+} ir susikaupus organinei medžiagai, konkuruojant dėl absorbcijos vietų. Todėl šis sujungtas fosforas gali apibūdinti dirvožemio fosforo papildymo potencialą. Kalcio ir magnio surištas fosforas yra netinkamas neorganini fosforas komponentas su silpnu išsiskyrimu tik rūgštinėmis sąlygomis. Huminis fosforas, kuris yra pagrindinis organinio fosforo komponentas, gali būti atskirtas iš dirvožemio organinės medžiagos. Jis yra lengvai prarandamas su paviršiaus nuotėkiu dėl žemo fiksavimo laipsnio su dirvožemio dalelėmis (Li et al., 2016, Cui et al., 2019). Fosforo frakcijų transformacijos mechanizmo ir pagrindinių aplinkos veiksnių, kontroliuojančių fosforo frakcijų

pasiskirstymą, identifikavimo išaiškinimas yra svarbūs gerinant trąšų panaudojimą ir fosforo taršos šaltinių iš žemės ūkio mažinimą.

1. 3. Erozijos reikšmė fosforo junginių pokyčiams sistemoje dirvožemis-vanduo

Pasaulio mastu dirvožemio erozija yra viena didžiausių problemų. Pagal sukeliančius veiksnius erozija yra skirstoma į vėjinę, vandeninę, mechaninę bei mišriąją (Kinderienė, 2011). Šiame darbe didžiausias dėmesys skiriamas vandens erozijai, dėl kurios vyksta intensyvus maistinių medžiagų nuplovimas bei išplovimas.

Paviršinę vandens eroziją skatina krentantys lietaus lašai. Ji žalingiausia šlaituose, kur lietaus lašų išjudintos dirvožemio dalelės šlaitu žemyn nusviedžiamos toliau negu į viršų. Lašelinė dirvožemio erozija nepageidautina net lygiame lauke, kur dirvožemis dėl lietaus lašų beveik vienodai ištaškomas visomis kryptimis. Šiuo atveju lietaus lašai suardo dirvožemio trupininę struktūrą. Vėliau dirvos paviršiuje formuojasi augalams dygti ir kvėpuoti trukdanti plutelė. Žolėmis, krūmais ar medžiais apaugusiuose šlaituose vandens lašus sulaiko augalai. Paviršinės dirvožemio erozijos atveju nunešami net du trečdaliai viso dėl ardymo vandeniui netenkamo dirvožemio (Mažvila, 2009).

Vandens erozija yra itin pavojinga ir aktuali kalvoto reljefo vietovėse. Nustatyta, kad daugiausia žalos padaro augalais neapsaugoto įdirbto dirvožemio šlaitu vos pradantis tekėti vanduo (Staugaitis, 2018). Tuo metu vanduo teka beveik visu šlaito paviršiumi ir pradeda nešti mažiausiai su dirvožemio paviršiumi sukibusias dirvožemio daleles (Mažvila, 2009). Vandens erozijos žala tuo didesnė, kuo statesni šlaitai ir kuo trumpiau dirvą nuo erozijos saugo augalai. Prie vandens erozijos pagreitinimo žmogus labiausiai prisideda sunaikindamas miškus ir daugiametę žolinę augmeniją. Vandens erozija Lietuvoje yra labiausiai paplitusi dirvožemio erozijos forma. Daugiau nei 15% žemės ūkio naudmenų yra vienokiu ar kitokiu laipsniu paveikti vandens erozijos (Mugauskienė, 2017). Kaip rodo LAMMC (Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centras) atlikti tyrimai, organinių medžiagų dirvožemyje labiausiai mažėja, kai žemė intensyviai dirbama, naudojama daug mineralinių trąšų, sėjomainoje vyrauja migliniai javai ir trūksta organinių trąšų. Auginant ilgamečių žolių, jų daugiakomponenčių mišinių, pupinių augalų, reguliariai naudojant žaliąsias trąšas, įsėjant tarpinių pasėlių ir įterpiant daugiau augalų liekanų, dirvožemyje daugėja organinių medžiagų ir gerėja jų kokybė. Labiausiai dirvožemio erozija pasireiškia Vakarų ir Pietryčių Lietuvoje (kalvotų Lietuvos rajonų dirvožemiai), o didžiausią įtaką jai daro statūs šlaitai, iškrintančių kritulių kiekis ir jų intensyvumas (Staugaitis, 2018; Kinderienė ir kt., 2013).

Eroziją taip pat stiprina ir spartina žmogaus veikla – netinkamos žemės dirbimo technologijos ir derliaus nuėmimo būdai, miškų kirtimas, žemės apleidimas, dirvožemio suslėgimas dėl sunkiosios technikos, gyvulių, todėl į dirvą negali patekti oras ir vanduo, augalų šaknys negauna pakankamai vandens ir deguonies (Europos bendrijos, 2009). Taip pat didelę įtaką daro nesaikingas ar netaisyklingas tręšimas. Dirvožemis praranda mineralų ir organinių trąšų sudėtyje esantį fosforą dėl: neatliktos pirminės dirvožemyje esančių mineralų analizės ir nesubalansuotos trąšų dozės, kurios neatitinka faktinių pasėlių poreikių; tręšimo netinkamu laiku; trąšų naudojimo pernelyg didelėmis porcijomis tuo pačiu metu; buferinės zonos nebuvimo, kuomet neapsaugomos upės, kanalai ar vandens telkiniai (Staniszewska ir kt., 2017).

Maistingųjų medžiagų nuplovimas bei išplovimas – nuostolingas ūkininkams ir kenksmingas aplinkai procesas, kurio metu maistingosios medžiagos, daugiausia azotas ir fosforas patenka į povandeninį arba paviršinį vandenį (Staniszewska ir kt., 2017). Cheminių elementų išplovimo ir nuplovimo nuostolius žemės ūkio naudmenoms daro įtaką įvairūs veiksniai: hidroterminis režimas, kritulių kiekis ir jų intensyvumas, tręšimo intensyvumas, trąšų pavidalas, dirvožemio mikrobiologinis aktyvumas, augalinė danga, šlaito statusas, žemės dirbimas ir kt. Pasak M. Staniszewska (2017), fosforas iš žemės ūkio paskirties dirvožemių nuteka susijungęs su dirvožemio dalelėmis arba kaip organinė suspenduota medžiaga. Dirvos apsaugojimas nuo erozijos – labai svarbus dalykas, kalbant apie fosforo nutekėjimą į paviršinį vandenį.

Mažinant dirvožemio eroziją būtina kompleksiskai taikyti ūkines, agrotechnines ir organizacines priemones. Kalvoto reljefo ūkiuose turi būti taikomos priešerozinės sėjomainos (Steiner et al., 2012). Jei kalvų šlaito nuolydis yra iki 5°, sėjomainoje daugiametės žolės turi sudaryti ne mažiau kaip 35–45 %, jeigu nuo 5° iki 7° – ne mažiau kaip 50 % bendro ploto. Nuo 7° iki 10° statumo šlaituose sėjomainoje daugiamečių žolių plotas turėtų sudaryti ne mažiau kaip 65–80 %. Statesniuose šlaituose turi būti auginamos tik daugiametės žolės (Kinderienė, 2011). Dirvožemį nuo ardymo geriausiai saugo miškų ir krūmų augalija. Tankūs ir vešlūs augalai savo lapija jį gerai saugo nuo lietaus lašų bei vėjo ardomosios veiklos, o šaknų sistema leidžia vandeniui lengviau prasiskverbti į gilesnius dirvožemio sluoksnius, mažina nutekančio vandens kiekį ir kartu saugo nuo šlaitų nutekančių vandens srautų (Collins et al., 2004). Erodotų kalvų dirvožemiai itin stokoja maisto medžiagų, todėl tręšimas arba rūgščių dirvožemio kalkinimas taip pat yra svarbi priešerozinės agropriemonės. Ir agronominiu, ir ekologiniu atžvilgiu kalvose aktualus augalų tręšimas biologine trąša mėšlu ir optimalių jo normų nustatymas. Kalvotas dirvas saugant nuo erozijos, o gamtą nuo taršos ir siekiant dirvožemyje sukaupti

maisto atsargų, didelį dėmesį reikia skirti tarpinių pasėlių auginimui bei žemės dirbimų padargų naudojimą kalvose (Kinderienė, 2011).

1. 4. Dirvožemio erozijos tyrimai Lietuvoje

Pokario metais į dirvožemio erozijos problemą atkreipė dėmesį mokslininkai – V. Čepulytė, A. Basalykas, P. Garmus ir kt., kurie išskėlė dirvožemio erozijos tyrimų svarbą tiek ūkiniu, tiek ir moksliniu atžvilgiu (Račinskas, 1958). Pirmuosius dirvožemio erozijos tyrimus Lietuvos žemdirbystės instituto (LŽI) Dūkšto bandymų stotyje pradėjo dr. A. Pajarskaitė. Ji sudarė Lietuvos denuduotų dirvožemių ir reljefo morfometrinius žemėlapius, Žemdirbystės instituto Dūkšto bandymų stotyje įrengė ilgamečius dirvožemio erozijos tyrimų stacionarius bandymus (1962). Juose gauti duomenys parodė didžiulę šios krypties darbų gamtosauginę svarbą ir aktualumą, saugant dirbamų laukų dirvožemius nuo sparčios degradacijos.

Pasak J. Mažvilos ir kt. (2009), Lietuvos žemdirbystės instituto (LŽI) Kaltinėnų bandymų stotis įkurta atlikti tyrimus Žemaičių aukštumoje vyraujančiuose kalvoto reljefo balkšvažemiuose. Šiai zonai būdingi gausūs krituliai, stiprus vėjas, o ūkininkaujant didelis dėmesys skiriamas dirvų apsaugai nuo ardymo žemės dirbimo padargais. Pirmaisiais veiklos dešimtmečiais daug dėmesio skirta kalvose auginamų augalų produktyvumo ir ekonominio efektyvumo didinimui, kalvoto reljefo dirvožemių savybių tyrimams. Žymų indėlį to laikotarpio veikloje paliko 10 metų bandymų stočiai vadovavęs dr. O. Visockis. Jo 1971 m. išleista knyga „Dirvožemių erozija“ ir mokslinės bei gausios populiarios publikacijos turi išliekamąją vertę.

1999 m. S. Gužys parengė disertaciją „Žemės ūkio augalų derliaus ryšio su žemdirbystės sistemomis, dirvožemio ir vandens rodikliais analizė“, kurioje nustatyta agropriemonių komplekso įtaka augalų derliui, jo kokybei; įvertinta biologinės ir intensyvios žemdirbystės sistemų įtaka drenažo ir gruntinio vandens cheminei sudėčiai, maisto medžiagų ir įvairių cheminių elementų bei junginių migracijai; nustatytas cheminių elementų ir junginių išplovimo ryšys su tręšimu ir gaunamu derliumi; įvertintas maisto medžiagų balansas taikant skirtingo intensyvumo žemdirbystės sistemas ir kt.

XXI a. pirmoje pusėje mokslininkai A. S. Sileika ir kt. išleido straipsnį apie agrarinės reformos poveikį maistinių medžiagų nuotėkiui Lietuvoje („Impact of the agrarian reform on nutrient runoff in Lithuania“, 2003). Straipsnyje rašoma apie maistmedžiagių patekimą į Baltijos jūrą ir ten vykstančią eutrofikaciją, kurią sukelia ūkiuose naudojamos trąšos – kaip opiausia problema XX a. antroje pusėje. A. Povilaitis parašė straipsnių apie fosforo ir azoto kaupimosi tendencijas Lietuvos upėse dėl

agrikultūros tema („Phosphorus trends in Lithuania rivers affected by agricultural non-point pollution“, 2004), „Impact of agriculture decline on nitrogen and phosphorus loads in Lithuania rivers“, 2006). 2006 m. fosforo šaltinius ir nuotėkį Žuvinto baseine tyrė J. Taminskas ir kiti mokslininkai. Lietuvos žemdirbystės instituto mokslininkai (B. Jankauskas, G. Jankauskienė) tais pačiais metais apžvalginiame-moksliniame straipsnyje išanalizavo kiekybinius eruduojamų dirvožemių organinės medžiagos pokyčius dėl skirtingo žemės naudojimo.

S. Gūžio bei Z. Petrokienės straipsnyje („Skirtingai tręštų sėjomainos kultūrinių augalų įtaka fosforo migracijai agroekosistemoje“, 2006) apibendrinti 1997–2003 metais LŽŪU VŪI (Lietuvos žemės ūkio universiteto Vandens ūkio institutas) tyrimų, atliktų fosforo apykaitos agroekosistemoje (žmogaus sukurtoje ekologinėje sistemoje), giliau karbonatingo, giliau glėjiško lengvo priemolio rudžemyje keturių skirtingai tręštų kultūrinių augalų sėjomainų (Norfolko, kaupiamųjų, javų, žolių) sąlygomis, rezultatai: fosforo koncentracija drenažo vandenyje priklauso nuo kritulių kiekio, sėjomainos, augalų tręšimo bei fosforo balanso; mažiausia fosforo koncentracija drenažo vandenyje išsiskyrė produktyviausios kaupiamųjų ir javų sėjomainos; fosfatų ir suminio fosforo išplovimas priklauso nuo drenažo nuotėkio, fosforo junginių koncentracijos drenažo vandenyje, taikomos sėjomainos rotacijos, jos produktyvumo ir jį lemiančių augalų mineralinės mitybos veiksnių; subalansuotas lauko augalų tręšimas fosforo trąšomis, lydimas didesnio derlingumo, nedidelio teigiamo fosforo balanso agroekosistemoje, apriboja fosforo junginių išplovimą drenažu.

Žemaičių aukštumos dirvožemių erozijos problemos tyrinėjamos Kaltinėnų bandymų stoties (Vėžaičių filialas) mokslo darbuotojų. Šios zonos dirvožemių agrofizines ir agrochemines savybes ir ardomų dirvožemių našumą tyrinėjo ir aprašė O. Visockis, priešerozinio dirvų dirbimo ir pasėlių priežiūros klausimus tyrinėjo V. Mizaras ir V. Feiza, pasėlių priežiūros agrotechnines ir agrochemines priemones derino D. Zinikevičiūtė ir I. Kinderienė (Jankauskas, 1994, 1996).

Ekspertų metu (Kinderienė ir kt., 2013), kurie rengti 2011–2012 m. Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centro (toliau, LAMMC) Vėžaičių filialo trijuose Kaltinėnų dirvožemio erozijos stacionarų laukuose, esančiuose 7–9°, 9–11° ir 7–8° statumo šlaituose, nustatyta, jog vandeninės dirvožemio erozijos nuostoliai, vandens nuotėkis ir prarastų maisto medžiagų kiekis labiausiai priklausė nuo šlaito dirvožemio apželdinimo augalais ir granulimetrinės dirvožemio sudėties. Šlaitai, apauginti ilgalaikiais žolynais, kuriuose susiformavusi stipri velėna, atsparūs ardymui. V. Žekaitė ir kiti mokslininkai (2015) tyrė azoto, fosforo ir kalio balansą ekologinėje keturlaukėje sėjomainoje. Nustatyta, kad dėl ekologinių trąšų naudojimo humuso ir judriojo fosforo kiekis per sėjomainos rotaciją dirvožemyje beveik nepakito, o cheminių elementų išplovimas iš dirvožemio didesnis vasaros–rudens

nei žiemos–pavasario laikotarpiu. Lauko eksperimentas (Jodaugienė ir kt., 2015), atliktas 1967–2012 m. Aleksandro Stulginskio universiteto Bandymų stotyje, vidutinio sunkumo karbonatingame giliau glėžiškame išplautžemyje, parodė, kad išnešamų maisto medžiagų kiekiai priklausė nuo javų derlingumo ir skyrėsi auginant juos po įvairių priešsėlių. Didėjant žieminių rugių ir žieminių kviečių grūdų derlingumui patikimai didesni azoto, fosforo ir kalio kiekiai buvo sukaupti šių javų grūduose. Didėjant šiaudų derlingumui juose patikimai didėjo azoto ir fosforo kaupimas, tačiau mažėjo kalio. Azoto, fosforo ir kalio kiekiai vasarinių miežių ir avižų grūduose buvo atvirkščiai proporcingi jų derlingumui. Didėjant vasarinių miežių ir avižų šiaudų derlingumui azoto kiekis mažėjo, o fosforo ir kalio kiekiai mažėjo didėjant avižų šiaudų derlingumui.

Išanalizavus literatūrą, susijusią su fosforo ir kitų maistinių medžiagų nutekėjimu iš dirvožemio į paviršinius vandenis, galima pastebėti, jog dirvožemis, kaip atskira sfera, bei jo erozija įvairiais periodais buvo lygiagrečiai tirti tiek Lietuvos (V. Ruokis, D. A. Pajarskaitė, B. Jankauskas ir kt.), tiek ir užsienio šalių (V. Dokučajevs, M. M. Mekonnen, A. Hoekstra ir kt.) mokslininkų. Šių autorių darbai turi tiek didelę mokslinę, tiek ir praktinę reikšmę.

Pastaruoju metu aktualia problema tampa azoto ir fosforo junginių patekimas į paviršinius vandenis, todėl atsiranda poreikis įvertinti ir atrasti priemones, kurios mažintų šių maistmedžiagių patekimą. Šiame darbe atliekamas tyrimas, palyginant lauko augalų sėjomainos ir ilgalaikio žolynų priešerozinį poveikį, siekiant sumažinti fosforo patekimą iš agroekosistemų su nuotėkių kalvų šlaitais į upes ir upelius, kurie galiausiai įteka į Kuršių marias ir Baltijos jūrą.

2. TYRIMŲ VIETA, OBJEKTAS IR METODIKA

Tyrimo vieta – tyrimas buvo atliktas 2019 m. Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centro, Vėžaičių filialo ilgalaikiuose erozijos stacionaruose: *1 stacionaras* (55°34'01" Š ir 22°29'20" R, Užpelkių km. Kaltinėnų sen.) ir *2 stacionaras* (55°35'02" Š ir 22°28'37" R Milaičių km., Kaltinėnų sen.) įrengtuose 1993 m. (2 pav.).



2 pav. Vietos, kuriose buvo vykdomi bandymai (U – Užpelkiai (1 stacionaras), M – Milaičiai (2 stacionaras)) (Kinderienė, Karčauskienė, 2012)

Tyrimo objektas – fosforo junginiai įvairiu intensyvumu eroduotame dirvožemyje (Žemaičių Aukštuma, Vakarų Lietuvos regionas) (2 pav.). Šios vietovės reljefas susideda iš vidutiniškai ir stipriai nuožulnių kalvų centrinėje dalyje bei trumpų, nedaug pasvirusių ir tankiai sugrupuotų kalvų aukštumos pakraščiuose. Žemaičių aukštumoje iškrenta daugiausiai Lietuvoje kritulių (metinis vidurkis – 858 mm) bei išgaruoja mažiausiai drėgmės (mažiau 540 mm). Taigi Žemaičių aukštumoje dirvožemio paviršiuje kasmet lieka daugiau kaip 300 mm kritulių, kurie susigeria į dirvožemį ir esant palankioms sąlygoms gali nutekėti į žemesnes reljefo vietas, sukeldami erozijos procesus. Šiame klimato atžvilgiu išskirtiniame šalies regione vidutiniškai nuteka apie 50 % kritulių vandens (palyginti, Lietuvoje vidutiniškai 32 %) (Jankauskas, 1994), kurie Akmenos, Jūros upėmis patenka į Nemuną ir taip fosforo junginiai iš agroekosistemų turi galimybę nukeliauti iki Kuršių nerijos bei Baltijos jūros (3 pav).



3 pav. Vakarinės Lietuvos dalies hidrografinis tinklas (žvaigždute pažymėta tyrimų vietovė)

Tyrimas atliktas taikant šiuos metodus:

- Lauko (tikslieji) bandymai (1 ir 2 eksperimentai);
- Laboratorinės analizės (dirvožemio ir nuotėkio vandens);
- Archyvinių duomenų analizė (LAMMC Vėžaičių filiale esantys ilgalaikių erozijos tikslųjų lauko bandymų duomenys 2014, 2015 ir 2017 metų).

Lauko (tikslieji) bandymai įrengti menkai ir vidutiniškai eroduotame smėlingame priemolyje (*Eutric Albeluvisol*). Tiriamų kalvų šlaitai – įgaubtos - išgaubtos morfologinės formos. Šlaitų viršutinių ir vidurinių dalių dirvožemis vidutiniškai eroduotas, o apatinių – menkai eroduotas. Erozijos stacionarų charakteristikos nurodytos 1 lentelėje (Kinderienė, Karčauskienė, 2012; Kinderienė ir kt., 2013).

1 lentelė. Tyrimo vietų charakteristikos

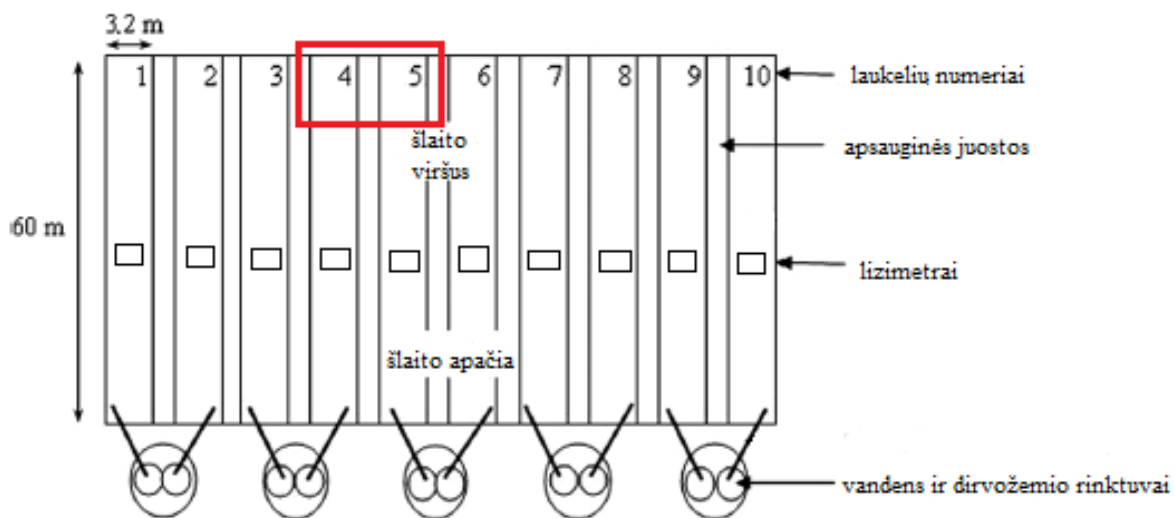
	<i>1 stacionaras</i>	<i>2 stacionaras</i>
Šlaito nuolydis (°)	7–9	9–11
Laukelių skaičius	10	10
Lauko ilgis (m)	60	65
Lauko plotis (m)	3,2	3,2

Fosforo junginių kitimas įvertintas dviejuose stacionaruose besiskiriančiuose ne tik šlaito nuolydžiu ir dirvožemio granulimetrine sudėtimi, bet juose taikytos skirtingo intensyvumo agropriemonės (metodika pagal Jankauską, 2008) (4 pav.):

1. Javų sėjomaina su juoduoju pūdymu (4 laukelis)
2. Netrešiamas ir nenaudojamas žolynas (5 laukelis)

Erozijos proceso atžvilgiu, intensyvią javų sėjomainą su juoduoju pūdymu sudaro – vasariniai miežiai, žieminiai kviečiai, žieminiai rugiai ir juodasis pūdymas, kurioje kasmet (daugiau nei penkioliką metų) taikomas pagrindinis ir priešsėjinis žemės dirbimai, naudojamos augalų apsaugos priemonės ir augalai kasmet trešiami kompleksinėmis mineralinėmis trąšomis – $N_{90}P_{90}K_{90}$

Netrešiamas ir nenaudojamas žolynas – tai penkioliką metų nešienaujamas ir neganomas žolynas, kuriame užaugusi biomasė yra pagrindinis maisto medžiagų ir anglies šaltinis dirvožemio biotai ir pagal savo ypatumus prilygsta natūraliai ekosistemai.



4 pav. Dirvožemio erozijos 1 ir 2 bandymų stacionarų planas kalvos šlaite (Jankauskas, 2008)



5 pav. Sėjomaininis augalas – žieminiai kviečiai (4) ir nešienaujamas žolynas (5) kalvos šlaite (1 stacionaras), 2019 m.

Taikytų agropriemonių (4 ir 5) laukeliuose (abiejuose stacionaruose) yra surenkamas nutekantis vanduo ir nuneštas dirvožemis. Dviejų gretimų laukelių apsaugose įrengti 2 m gylio ir 1,5 m skersmens 5 šuliniai, kuriuose sudėti rezervuarai, skirti surinkti dirvožemį ir vandenį. Į kiekvieną šulinį nukreipta po du nutekantį vandenį ir su juo nešamo dirvožemio rinktuvus. Tai išilgai perpjauti 30 cm skersmens polietileniniai vamzdžiai. Kiekviename šulinyje yra po du 200 l talpos rezervuarus, nuotėkoms ir nešmenims surinkti iš gretimų laukelių. Dirvožemio erozijos pasekmės nustatomos matuojant nuo laukelių nutekėjusio vandens tūrį ir nunešto dirvožemio masę. Tai daroma vegetacijos periodo metu po kiekvieno didesnio lietaus, sukėlusio didesnį nutekėjimą, o rudens–pavasario laikotarpiu – prisipildžius rinktuvų rezervuarams (Jankauskas, 2008).

Dirvožemio ir vandens mėginių paėmimas ir jų analizė. Šlaitu nutekėjusio vandens ir nuplauto dirvožemio mėginiai buvo paimti 2019 m. birželio 10 d., po praėjusios liūtis. Vandenyje nustatytas fosfatų (P-PO₄) (mg l⁻¹) kiekis, o dirvožemyje – granulimetrinė sudėtis ir judriojo fosforo koncentracija (P₂O₅) (mg kg⁻¹). Analizės atliktos LAMMC Agrocheminių tyrimų laboratorijoje.

Dirvožemio mėginiai agregatinės sudėties ir agregatų patvarumo vandenyje nustatymui buvo paimti 2019 m. liepos 30 d. iš viršutinio 0–5 cm armens sluoksnio, kuris labiausiai yra veikiamas vandens erozijos. Dirvožemio agregatinės sudėties (sausas sijojimas) įvertinimui Savinovo metodu (Vadiunina, Kočarina, 1989) buvo naudotas septynių sietų komplektas (6 pav.) išskiriant šias frakcijas: 10 mm, 5 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm. Šie skirtingo dydžio agregatai buvo pasverti,

paskaičiuota skirtingo dydžio agregatų procentinė dalis nuo bendros dirvožemio masės (1 priedas. 1 lentelė) ir iš jų sudarytas jungtinis mėginys (50 g) agregatų patvarumui vandenyje (šlapias sijojimas) įvertinti (2 priedas. 1 lentelė). Analizės atliktos LAMMC Vėžaičių filiale.

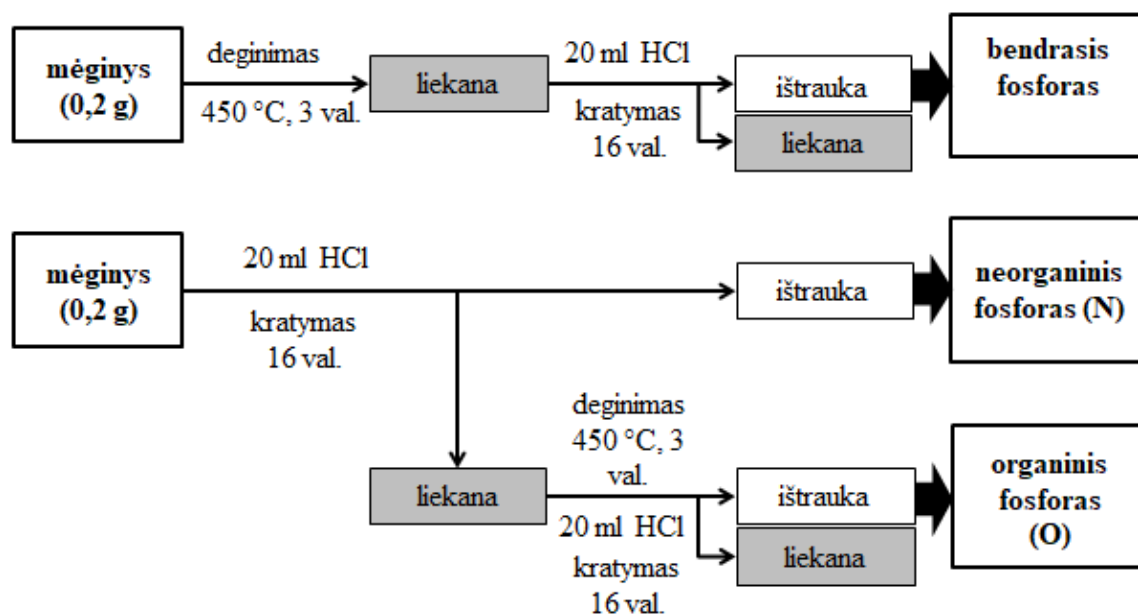


6 pav. Kratytuvas, skirtas dirvožemio agregatinės sudėties įvertinimui (sausas sijojimas)

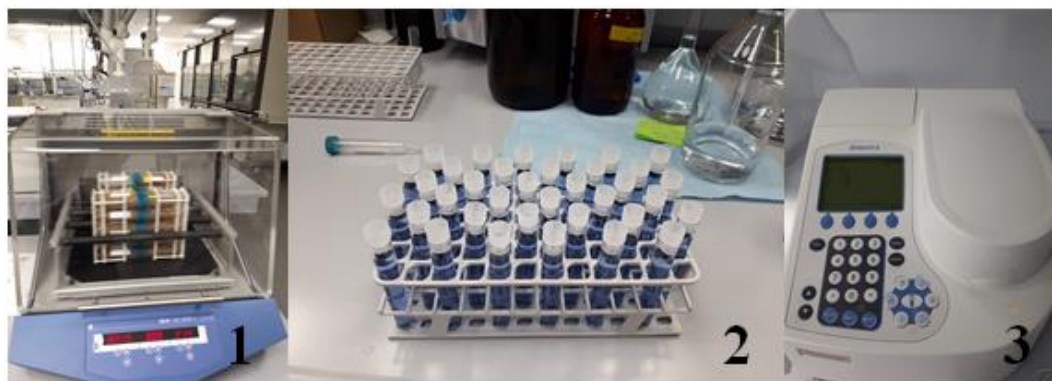
Dirvožemio mėginiai cheminei analizei (pH_{KCl} , C_{org} , N_{sum} , P_2O_5) atskirose šlaito dalyse buvo paimti du kartus (birželio 11 d. ir liepos 30 d.) augalų vegetacijos laikotarpiu iš viršutinio 0–10 cm armens sluoksnio. Analizės atliktos standartizuotais metodais LAMMC Agrocheminių tyrimų laboratorijoje.

Organinio (kurį sudaro ištirpęs organinis bei kietųjų dalelių fosforas), neorganinio bei bendrojo fosforo analizei mėginiai struktūrinių agregatų frakcijose buvo imti tik vieną kartą, o analizės atliktos Klaipėdos universiteto Jūrų tyrimų instituto laboratorijose pagal Gonzalez Medeiros et al. (2005) metodiką (7 pav.). Fosforo junginių pasiskirstymui struktūrinių agregatų frakcijose analizei atlikti buvo pasirinktos 5–3 mm, 2–1 mm ir 0,5–0,25 mm frakcijos (Rocha Junior et al, 2018; Cui et al., 2019). Dirvožemio ėminiai buvo susmulkinti grūstuvėje, pasverta 0,2 g ir 3 val. deginami krosnelėje palaikant 550 °C temperatūrą. Tuomet sumaišomi su distiliuotu vandeniu bei HCl ir kratomi 16 val. kambario temperatūroje. Po kratymo centrifuguojami 12 min 2500 rpm, kad atsiskirtų skystis iš neištirpusios kietosios fazės, ir į atskiras kolbeles sumaišomi kartu su reagentais. Absorbicija buvo nustatyta

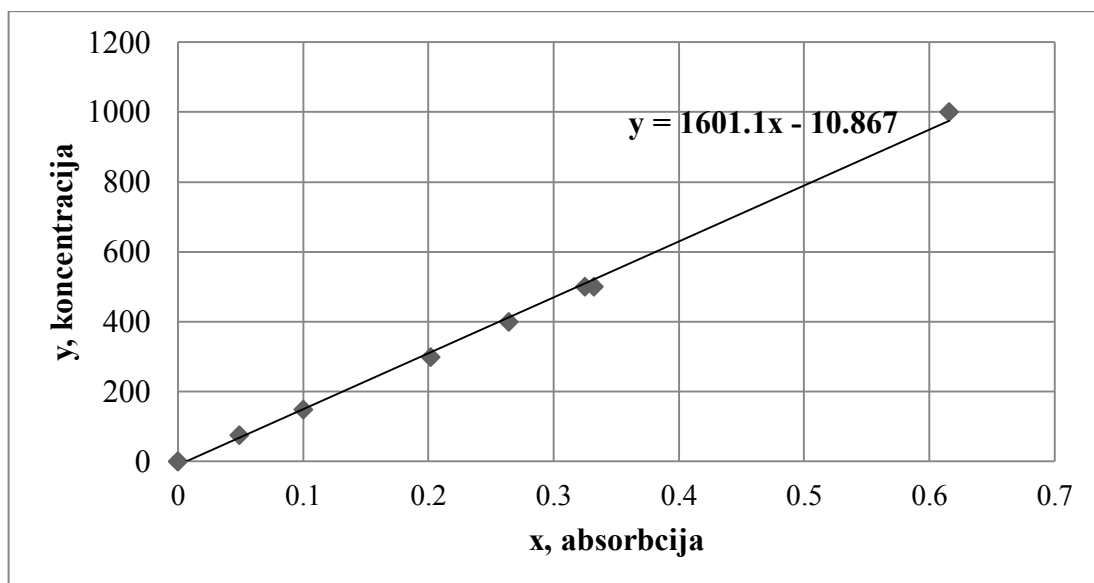
spektofotometriniu būdu (8 pav.), o organinio, neorganinio ir bendrojo fosforo kiekiai – išvedus tiesinę priklausomybę tarp absorbcijos ir koncentracijos (9 pav.).



7 pav. Laboratorinė fosforo junginių analizių schema (Gonzalez Medeiros et al., 2005)



8 pav. Fosforo junginių analizės svarbiausi etapai: tirpalo paruošimas (kratytuvus (1) ir spektofotometrinei analizei paruošti mėginiai (2)) ir spektofotometras (3)



9 pav. Tiesinė priklausomybė tarp absorbcijos ir koncentracijos bei lygtis, pagal kurią buvo apskaičiuoti bendrojo, neorganinio ir organinio fosforo kiekiai

Archyvinių duomenų analizė. Duomenys paimti iš ilgalaikių erozijos tikslųjų lauko bandymų (monitoringo) Šilalės r., Kaltinėnai (LAMMC Vėžaičių filialas), meteorologiniai duomenys - Laukuvos meteorologinės stoties. Analizei panaudoti 2014 m., 2015 m. ir 2017 m. fosfatų (PO_4) netekimo su kritulių vandens nuotėkiu (mg l^{-1}) bei judriojo fosforo (P_2O_5) praradimo su šlaitu nusiplovusiu dirvožemiu duomenys iš 1 ir 2 stacionarų.

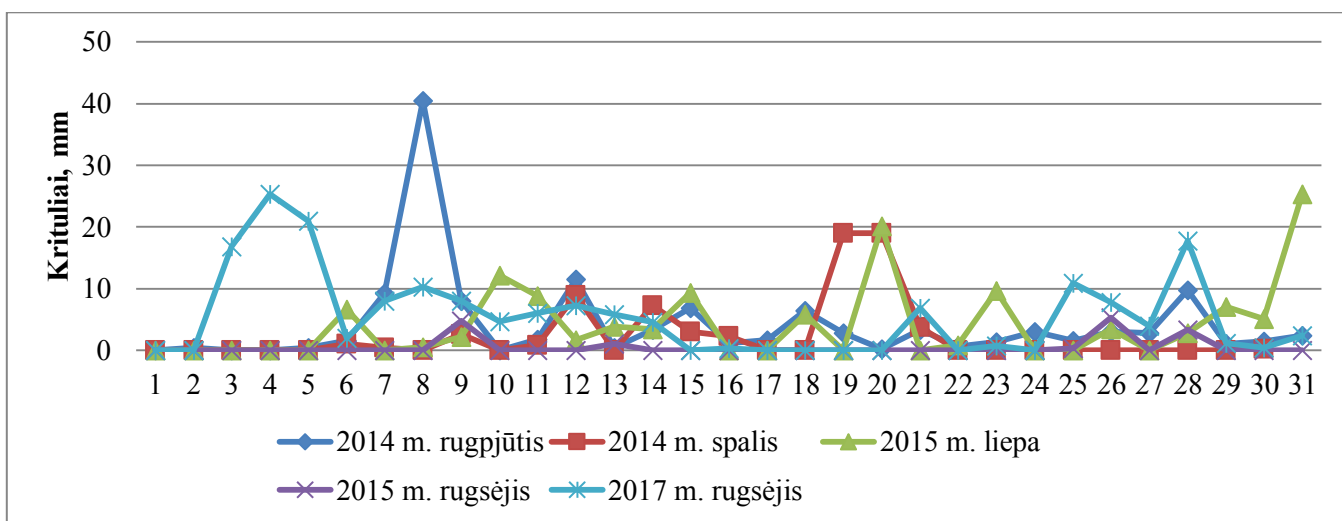
Statistinis tyrimo duomenų įvertinimas. Fosforo junginių duomenys dirvožemyje ir vandenyje įvertinti vienfaktorinės dispersinės analizės metodu (ANOVA). Duomenys buvo lyginami naudojant mažiausio skirtumo Fišerio testą (F), taikant $P < 0,05$ tikimybės lygį. Atskirų rodiklių tarpusavio priklausomybės įvertintos tiesinės koreliacijos koeficientais (R) ir apskaičiuotu patikimumo lygmeniu (P).

3. TYRIMŲ REZULTATAI

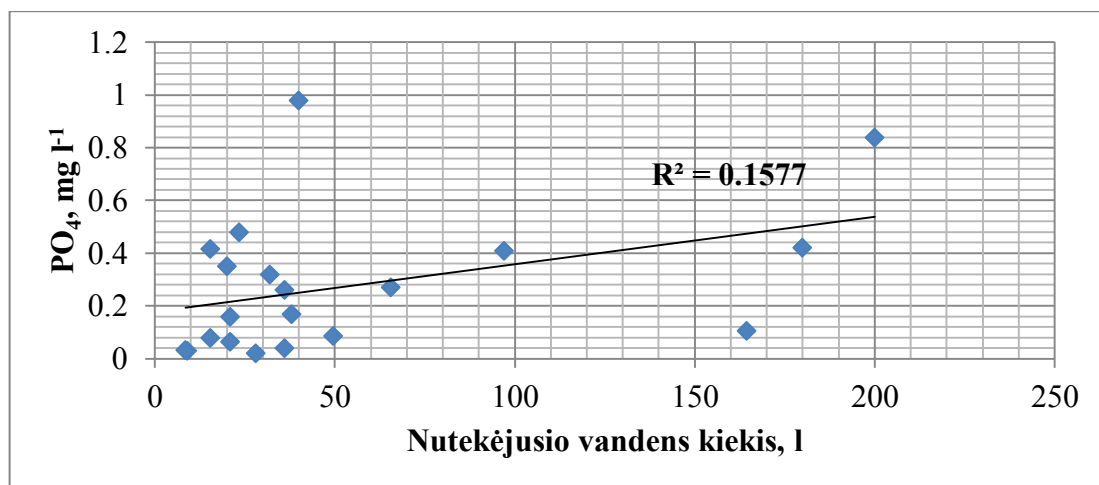
3. 1. Kalvos šlaito ypatumų ir klimatinė sąlygų įtaka fosforo junginių netekimui iš dirvožemio: archyvinių duomenų analizė

Ekspertų vietovių dirvožemis – menkai ir vidutiniškai eroduotas, giliau glėžiškas, pasotintasis balkšvažemis. Šlaitų viršutinių ir vidurinių dalių dirvožemis vidutiniškai eroduotas, o apatinių – menkai eroduotas. Šlaitų dirvožemiai granulimetrinės sudėties atžvilgiu pagal Fere trikampį yra tokie: dulkiškas vidutinio sunkumo priemolis ant dulkiško lengvo molio – 7–9° šlaitas (1 stacionaras); dulkiškas lengvas priemolis ant rišlaus smėlio su giliau slūgsančiu dulkišku vidutinio sunkumo priemoliu – 9–11° šlaitas (2 stacionaras) (Kinderienė ir kt., 2013).

Fosfatų (PO₄) netekimas su vandens nuotėkiu. Įvertinus vidutines fosfatų (PO₄) nuostolių ir nusiplovusių vandens kiekių šlaitu reikšmes nuotėkių laikotarpiais (10 pav.) charakteringais kritulių kiekiu atžvilgiu, nustatyta, kad 2017 m. rugsėjo mėnesį iškritus gausiausiai kritulių (5,55 ±1,20 mm), fosfatų (PO₄) netekimas buvo mažiausias (0,05 ±0,02 mg l⁻¹), o nusiplovusio vandens kiekis siekė 59,30 l. Mažiausias vandens kiekio nutekėjimas, bet didžiausias fosfatų (PO₄) netekimas vyko 2014 m. spalio mėn. (0,46 ±0,17 mg l⁻¹ ir 23,00 l), nors krituliai šiuo laikotarpiu buvo negausūs (2,28 ±0,90 mm) (3 priedas. 1 lentelė, 3 priedas. 2 lentelė). Koreliacinis ryšys tarp nutekėjusio vandens kiekio bei fosfatų (PO₄) nuostolių yra labai silpnas (R² – 0,16) (11 pav.).



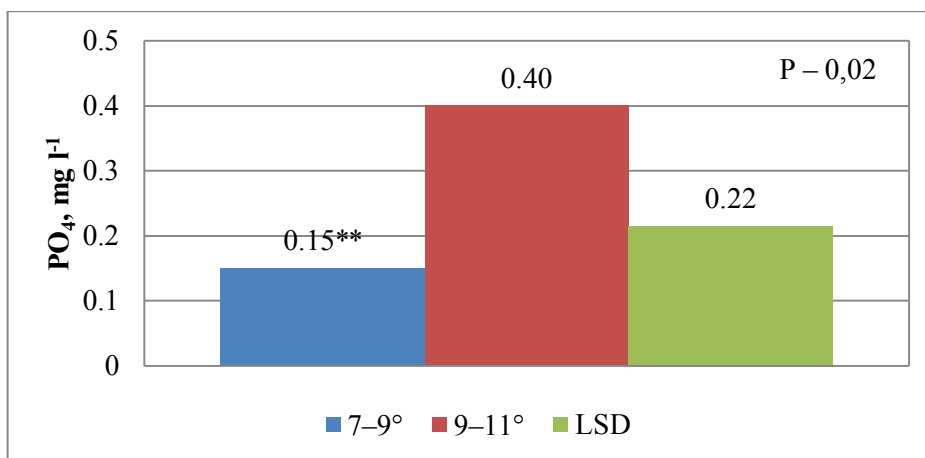
10 pav. Kritulių kiekis (mm) tiriamuoju laikotarpiu (Laukuvos meteorologinės stoties duomenys)



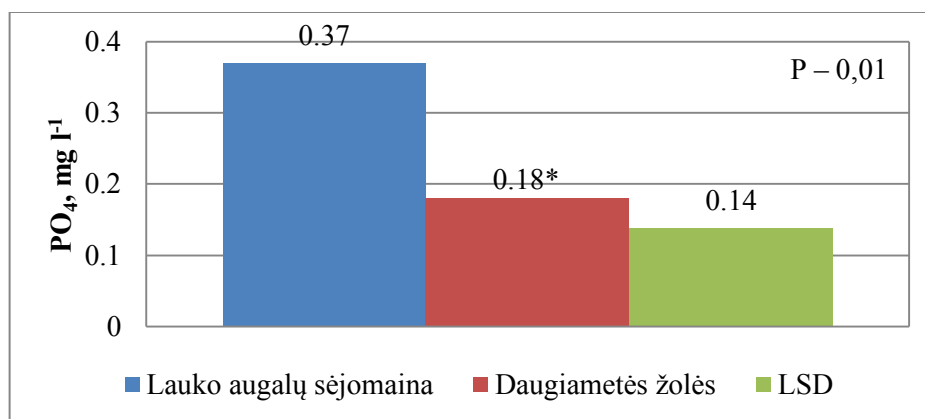
11 pav. Fosfatų (PO₄) kiekio (mg l⁻¹) priklausomybė nuo nutekėjusio vandens kiekio (l)

Fosfatų (PO₄) nusiplovimas su vandens nuotėkiu nuo skirtingo statumo šlaitų padengtų skirtingais augalais. Nustatyta, jog fosfatų (PO₄) nuostoliai yra mažiausi laukelyje, apželdintame ilgalaikiais žolynais, kuriuose susiformavusi stipri velėna (Kinderienė ir kt., 2013). Šiuos teiginius atspindi ir tiriamieji 2014, 2015 ir 2017 metai. Abiejų stacionarų šlaituose vyrauja ta pati tendencija – lauko augalų sėjomainoje tiek nutekėjusio vandens kiekiai, tiek fosfatų (PO₄) nuostoliai yra ženkliai didesni nei daugiamečių žolių lauke (skirtumai siekia nuo 1,7 iki 13,9 kartų) (3 priedas. 1 lentelė, 3 priedas. 2 lentelė). Gautieji duomenys rodo, kad nutekėjusio šlaitu vandens kiekis priklauso ne tik nuo kritulių kiekio ar jų intensyvumo, bet ir nuo kalvos šlaite auginamų augalų.

Įvertinus šlaito statumo ir skirtingų augalų įtaką fosfatų (PO₄) nuostoliams nustatyta, kad nuo 9–11° šlaito netenkama 2,7 karto daugiau fosfatų (PO₄) (0,40 mg l⁻¹) nei nuo mažesnio statumo 7–9° šlaito (0,15 mg l⁻¹). Mažiausias reikšmingas skirtumas tarp vidurkių (LSD) – 0,22, kai P ≤ 0,02 (12 pav.). Taip pat nustatyta, jog fosfatų (PO₄) nuostoliai su šlaitu nutekėjusiu vandeniu iš esmės 2,1 kartą didesni šlaite padengtame sėjomainos augalais (0,37 mg l⁻¹), kur kasmet atliekamas žemės dirbimas, nei šlaite padengtame daugiametėmis žolėmis (0,18 mg l⁻¹), o mažiausias reikšmingas skirtumas tarp vidurkių (LSD) yra 0,14, kai P ≤ 0,01 (13 pav.).



12 pav. Fosfatų (PO₄) nuostoliai priklausomai nuo skirtingo statumo šlaitų

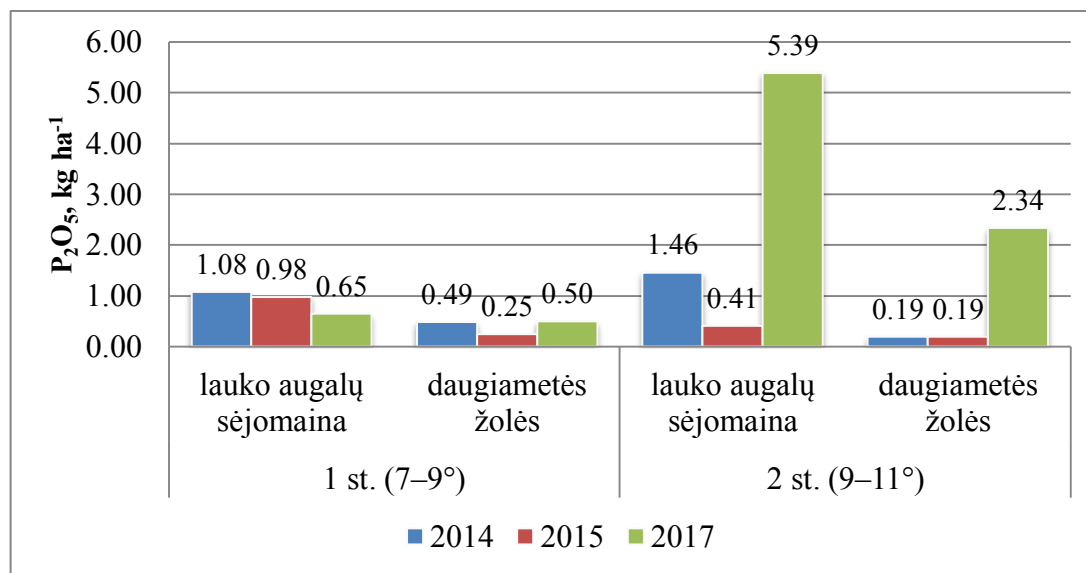


13 pav. Fosfatų (PO₄) nuostoliai priklausomai nuo skirtingų agropriemonių

Judriojo fosforo (P₂O₅) nuostoliai su nutekėjusiu dirvožemiu. Įvertinus vidutines judriojo fosforo (P₂O₅) nuostolių su nutekėjusiu dirvožemiu reikšmes, didžiausias judriojo fosforo (P₂O₅) kiekis nustatytas 2017 m. (2,22 ±0,98 kg ha⁻¹), o mažiausias – 2015 m. (0,46 ±0,16 kg ha⁻¹). Didžiausias judriojo fosforo kiekis (P₂O₅) su nuneštu dirvožemiu – 2,42 ±1,24 kg ha⁻¹ ir 0,91 ±0,59 kg ha⁻¹ – prarastas su nuneštu dirvožemiu nuo 9–11° statumo lengvo priemolio šlaito (3 priedas. 3 lentelė). Šiame šlaite P₂O₅ nuostoliai ~2,6 kartus didesni negu 7–9° statumo šlaite. Kalvos šlaituose auginant daugiametes žoles judriojo fosforo (P₂O₅) nuostoliai yra kur kas mažesni (~2,5 kartų) nei auginant kasmet vis kitus sėjomainos augalus (13 pav.)

Tyrimų duomenys abiejuose stacionaruose parodo, kad fosforo netekimas dėl vandeninės erozijos bei augalijos, kaip svarbiausio priešerozinio veiksnio, glaudžiai siejasi su granulimetrine dirvožemio sudėtimi, šlaito polinkio kampu bei kritulių kiekiu. Tokius pastebėjimus, pagrįstus tyrimų duomenimis, pateikė ir kitų šalių erozijos tyrėjai Collins (2004), Easton (2005), Li (2018) ir kt.

Atlikus tiriamųjų metų lyginamąją analizę nustatyta, kad didžiausi judriojo fosforo (P_2O_5) nuostoliai buvo 2017 m. – 8,88 $kg\ ha^{-1}$, mažiausi – 2015 m. (1,83 $kg\ ha^{-1}$). Skirtumas siekia ~4,9 kartus (14 pav.). Tai leidžia teigti, kad klimato kaitos kontekste judriojo fosforo (P_2O_5) koncentracija nusiplovusiam šlaitu dirvožemyje ir toliau gali didėti.

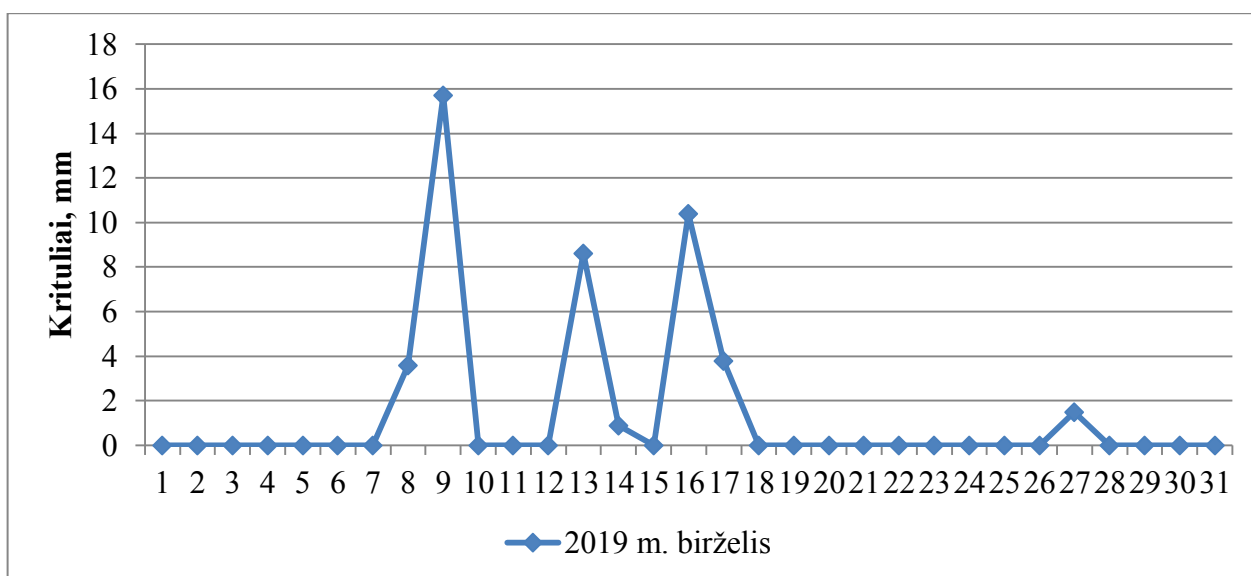


14 pav. Judriojo fosforo (P_2O_5) nuostoliai ($kg\ ha^{-1}$) su kalvos šlaitu nuneštu dirvožemiu

3. 2. Fosforo junginių netekimas iš dirvožemio priklausomai nuo nuotėkio, šlaito statumo ir taikytų agropriemonių

Fosfatų (PO_4) nusiplovimas su vandens nuotėkiu nuo skirtingo statumo ir granulimetrine sudėtimi besiskiriančių šlaitų. Dirvožemio nuostolių dydis dėl kritulių erozijos labai priklauso ir nuo auginamų augalų, ir nuo šlaito polinkio kampo bei dirvožemio, kuriame įrengti bandymai savybių (Li et al. 2017). Tyrimų laikotarpiu (2019 m. birželio 9–10 d.) iškrito gausūs krituliai (15,70 mm) (15 pav.).

Įvertinus vandens nuotėkį bei su juo nuplautus fosfatų (PO_4) nuostolius, nustatyta, jog didžiausi nutekėjusio vandens (230,00 l) bei fosfatų (PO_4) ($0,32\ mg\ l^{-1}$) kiekiai buvo nuo statesniojo 9–11° šlaito užimto sėjomainos augalais. Mažiausias vandens ir fosfatų ($3,00\ l$ ir $0,26\ mg\ l^{-1}$) kiekis nutekėjo nuo 7–9° kalvos šlaito, kurio paviršius buvo padengtas daugiametėmis žolėmis.



15 pav. Kritulių kiekis (mm) tiriamuoju laikotarpiu (Laukuvos meteorologinės stoties duomenys)

2 lentelė. Fosfatų (PO_4) netekimas su vandens nuotėkiu nuo skirtingo statumo šlaitų, taikant skirtingas agropriemonės 2019 m.

Stacionarai/ agropriemonės		Vandens kiekis, (l)	PO_4 , (mg l^{-1})
1 st. (7–9°) (dulkiškas sunkus priemolis-vidutinio sunkumo priemolis)	Lauko augalų sėjomaina	38,00	0,25
	Daugiametės žolės	3,00	0,26
2 st. (9–11°) (rišlus smėlis- smėlingas lengvas priemolis)	Lauko augalų sėjomaina	230,00	0,32
	Daugiametės žolės	22,00	0,23

Judriojo fosforo (P_2O_5) nuostoliai su nutekėjusiu dirvožemiu. Daugiausia su nuotėkiu nuplauta dirvožemio ir judriojo fosforo (P_2O_5) nuo statesniojo (9–11°) kalvos šlaito su lengvos granuliometrinės sudėties (rišlaus smėlio-vidutinio sunkumo priemolio) dirvožemiu (2 stacionaras). Pagrinde buvo nuplautas dirvožemis, kurį sudarė net ~74 % smėlis, o smulkožemio (dulkių ir molio) dalelės sudarė atitinkamai tik ~19 % ir 7 % (3 lent.).

3 lentelė. Kalvos šlaitu nuplauto dirvožemio granulimetrinė sudėtis 2019 m.

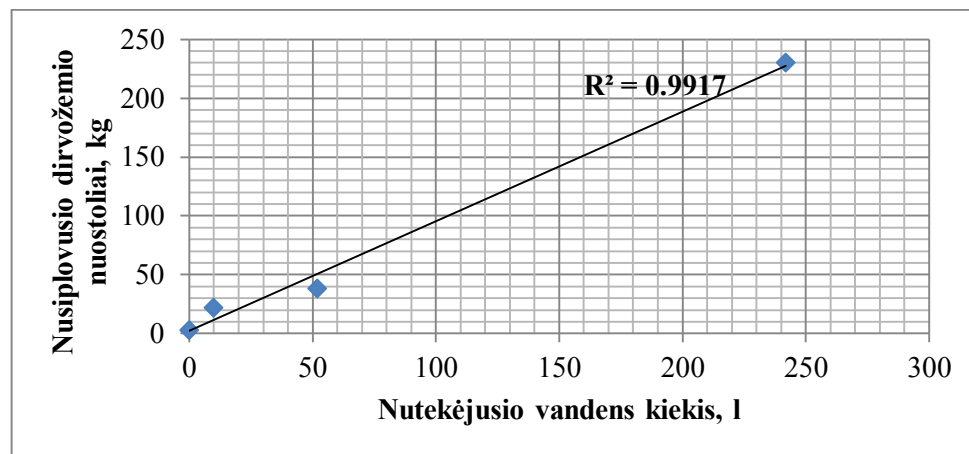
Stacionarai/ agropriemonės		Granulimetrinės sudėties frakcijos		
		Smėlis (%) (2000–63 μm)	Dulkės (%) (63–2 μm)	Molis (%) (<2 μm)
1 st. (7–9°) <i>(dulkiškas sunkus priemolis-vidutinio sunkumo priemolis)</i>	Lauko augalų sėjomaina	17,00	52,90	30,10
	Daugiametės žolės	–	–	–
2 st. (9–11°) <i>(rišlus smėlis- smėlingas lengvas priemolis)</i>	Lauko augalų sėjomaina	73,90	19,10	7,00
	Daugiametės žolės	67,60	25,40	7,00

Netekto dirvožemio kiekis priklausė ne tik nuo kalvos šlaito statumo bei dirvožemio granulimetrinės sudėties, bet ir nuo šlaito padengimo augalais (agropriemonių). Statesniajame šlaite dirvožemio nuostoliai lauko augalų sėjomainoje siekė 242,00 kg, o su juo netekta: judriojo fosforo (P_2O_5) – 207,00 mg kg^{-1} , organinio fosforo – 0,14 mg kg^{-1} ir neorganinio fosforo – 0,21 mg kg^{-1} . Dirvožemio ir fosforo junginių nuostolių nenustatyta 1-ojo stacionaro kalvos šlaite užimtame daugiametėmis žolėmis, kurio dirvožemis, palyginus su 2-ojo stacionaro, yra sunkesnės granulimetrinės sudėties t. y. dulkiškas sunkus priemolis-vidutinio sunkumo priemolis (51,80 % dulkės). Tačiau šio mažesnio statumo kalvos šlaite užimto lauko sėjomainos augalai su vandens nuotėkiu nusiplovė 52,00 kg dirvožemio, sudaryto iš dulkių ir molių dalelių (~53 % ir ~30 %) (4 lent.).

4 lentelė. Judriojo fosforo (P_2O_5) nuostoliai su kalvos šlaitu nuplautu dirvožemiu 2019 m.

Stacionarai/ agropriemonės		Nuplauta, (kg)	P_2O_5 , (mg kg^{-1})	Organinis fosforas, (mg kg^{-1})	Neorganinis fosforas, (mg kg^{-1})
1 st. (7–9°) <i>(dulkiškas sunkus priemolis-vidutinio sunkumo priemolis)</i>	Lauko augalų sėjomaina	52,00	114,00	0,14	0,21
	Daugiametės žolės	–	–	–	–
2 st. (9–11°) <i>(rišlus smėlis- smėlingas lengvas priemolis)</i>	Lauko augalų sėjomaina	242,00	207,00	0,14	0,23
	Daugiametės žolės	10,00	113,00	0,11	0,18

Koreliacinis ryšys tarp nutekėjusio vandens kiekio bei dirvožemio nuostolių dydžio yra labai stiprus ($R^2 = 0,99$) (16 pav.).



16 pav. Dirvožemio nuostolių (kg) priklausomybė nuo nutekėjusio vandens kiekio šlaitu (l)

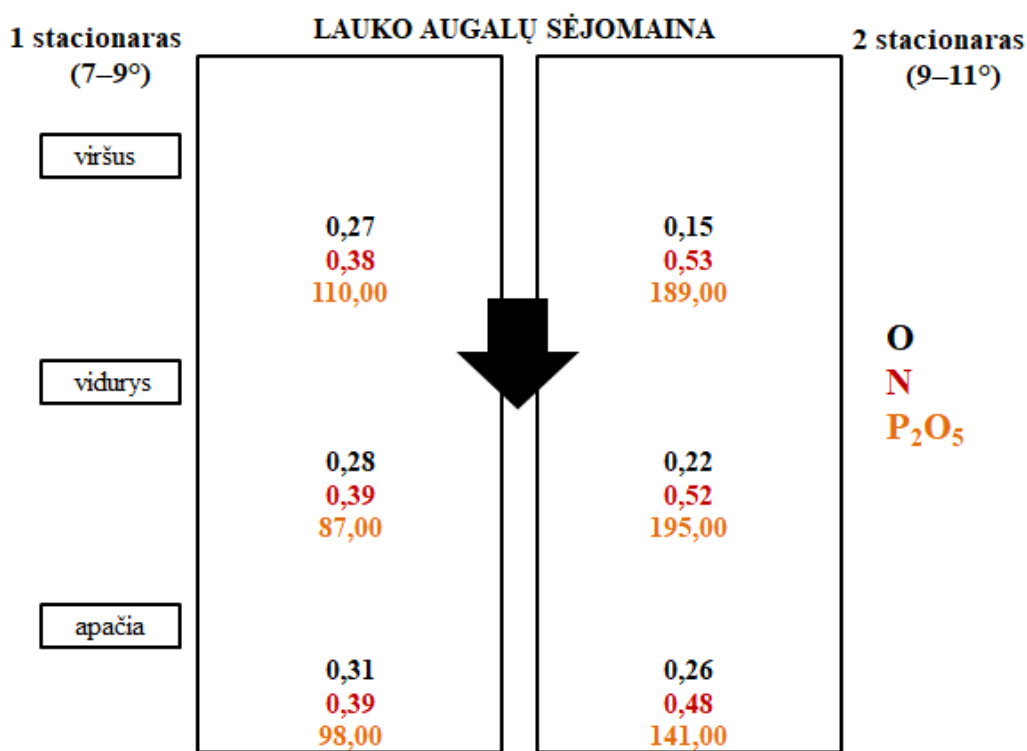
Šie gauti duomenys išryškina daugiamečių žolių, palyginus su sėjomainos augalais, pranašumą apsaugant kalvos šlaitą nuo ardymo. Paprastai dirvožemyje dominuoja neorganinis fosforas (Li et al. 2017). Tas atsispindi ir šio tyrimo rezultatuose, nes daugiau su nuplautu dirvožemiu yra prarandama neorganinio fosforo, nei organinio (4 lent.).

3. 3. Fosforo junginių pasiskirstymas atskirų šlaito dalių dirvožemyje ir skirtingo dydžio agregatuose lauko augalų sėjomainoje

Fosforo junginių pasiskirstymas atskirose šlaito dalyse. Fosforo junginių netekimo mažinimui nuotėkio metu iš žemės ūkio paskirties dirvožemių reikalingas detalesnis ištirtumas ir suvokimas apie atskiras fosforo formas ir jų pasiskirstymą kalvos šlaite (Reid et al., 2018). Bendrasis fosforas kalvos šlaito dirvožemyje iš esmės sumažėja, kai labai intensyvus nuotėkis ir didelė nuosėdų koncentracija šlaitu nutekėjusiame vandenyje. Dažniausiai tai būna augalų vegetacijos pradžioje, kai dirvožemio paviršius nepilnai padengtas augalais ir augalai tręšti didesnėmis mineralinių trąšų normomis. Literatūriniais duomenimis nustatyta, kad nusiplovusiame dirvožemyje vyrauja neorganinis fosforas t. y., fosforas surištas kietosiose dirvožemio dalelėse (mineraluose), kuris susidaro iš augalams prieinamų frakcijų, tokių kaip Olsen-P, Al-P, Fe-P, Ca-P (Li ir kt., 2018). Nežiūrint to, kad organinio fosforo kiekiai dirvožemyje nėra dideli, tačiau kai kurios jo formos ir frakcijos (labai judrios ir vidutiniškai

judrios) yra prieinamos augalams, o nesant augalų, šios formos bei frakcijos nuotėkio metu patenka į vandens ekosistemas (Wright, 2009).

Įvertinus dirvožemio organinio, neorganinio ir judriojo fosforo (P_2O_5) kiekius atskirose kalvos šlaito dalyse (viršus, vidurys, apačia) javų su juodu pūdymu sėjomainoje skirtingo statumo šlaituose, nustatyta, kad organinio fosforo visame šlaito dirvožemyje mažiau buvo 9–11° statumo šlaite, kurio dirvožemio granulimetrinėje sudėtyje vyrauja (65–87%) smėlio frakcija, o organinės anglies kiekis labai mažas (0,40–0,73 %) (17 pav, 5 lent., 6 lent.). Ypatingai mažai (0,15 mg kg⁻¹) organinio fosforo nustatyta šlaito viršutinėje dalyje, palyginus su vidurine ir apatine šlaito dalimis. Šio šlaito dirvožemyje mažas organinės anglies ir organinio fosforo kiekis, o priešingai didelis augalams prieinamo judriojo fosforo (P_2O_5) kiekis (141–195 mg kg⁻¹) rodo, kad sėjomainos augalai, dėl drėgmės trūkumo, neužaugina gausios šaknų sistemos, kuri papildytų organinės anglies atsargas dirvožemyje, o užaugantis sėjomainos augalų derlius nesunaudoja judriojo fosforo (P_2O_5), kuris turi tendenciją šiame dirvožemyje kauptis ir nusiplauti šlaitu žemyn esant intensyviems krituliams.



17 pav. Organinio (O) fosforo, neorganinio (N) fosforo ir judriojo fosforo (P_2O_5) (mg kg⁻¹) kiekių pasiskirstymas skirtingose šlaito dalyse

5 lentelė. Dirvožemio granulimetrinė sudėtis (viršutinio armens sluoksnio 0–5 cm) atskirose skirtingo statumo šlaitų dalyse lauko augalų sėjomainoje 2019 m., ($x \pm Sx$)

Stacionaras	Šlaito dalis	Smėlis (%) (2000–63 μm)	Dulkės (%) (2000–63 μm)	Molis (%) (63–2 μm)	Granulimetrinė sudėtis
1 st. (7–9°)	viršus	12,50	12,50	49,60	dulkiškas sunkus priemolis
	vidurys	15,10	15,10	54,70	dulkiškas sunkus priemolis
	apačia	24,60	24,60	49,50	vidutinio sunkumo priemolis
2 st. (9–11°)	viršus	86,80	86,80	8,50	rišlus smėlis
	vidurys	82,10	82,10	11,90	rišlus smėlis
	apačia	65,30	65,30	25,70	smėlingas lengvas priemolis

Pastaba: x – imties vidurkis, Sx – vidurkio paklaida

6 lentelė. Dirvožemio cheminės savybės ir vandenyje patvarių agregatų kiekis atskirose skirtingo statumo šlaitų dalyse, lauko augalų sėjomainoje 2019 m., ($x \pm Sx$)

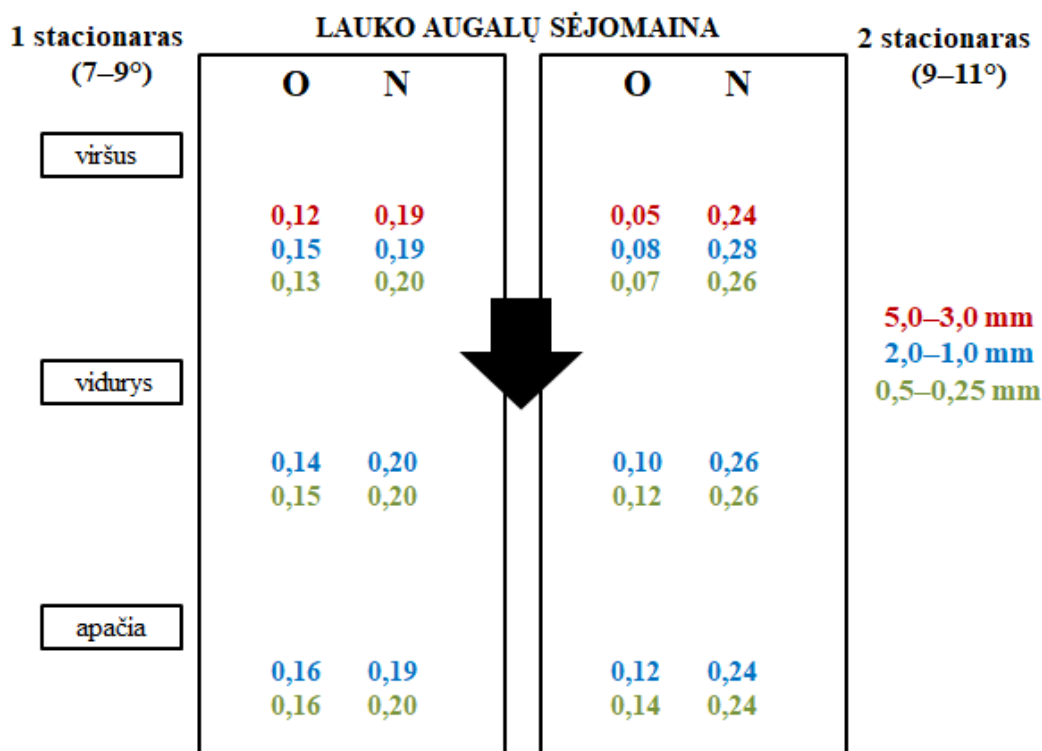
Stacionaras	Šlaito dalis	pH _{KCl}	C _{org} , %	Agregatų >0,25 mm kiekis, %
1 st. (7–9°) (dulkiškas sunkus priemolis-vidutinio sunkumo priemolis)	viršus	6,01 \pm 0,08	0,97 \pm 0,09	35,9 \pm 1,89
	vidurys	5,38 \pm 0,03	1,10 \pm 0,04	21,3 \pm 2,11
	apačia	4,95 \pm 0,05	1,18 \pm 0,08	27,9 \pm 1,54
2 st. (9–11°) (rišlus smėlis- smėlingas lengvas priemolis)	viršus	6,98 \pm 0,05	0,40 \pm 0,03	19,1 \pm 2,88
	vidurys	6,29 \pm 0,03	0,62 \pm 0,04	36,4 \pm 2,24
	apačia	5,64 \pm 0,02	0,73 \pm 0,11	27,6 \pm 1,74

Pastaba: x – imties vidurkis, Sx – vidurkio paklaida

Minėtos tendencijos neišryškėja mažesnio statumo 7–9° šlaite, kuriame organinio fosforo kiekiai yra didesni, o judriojo fosforo (P₂O₅) kiekiai, palyginus su statesniu šlaitu, yra 1,8 karto mažesni. Ir tai siejama su šio šlaito dirvožemio geresne drėgmės sorbcija, nes granulimetrinėje sudėtyje vyrauja dulkių ir dumblo frakcija, ir intensyvesniu sėjomainos augalų augimu bei judriojo fosforo (P₂O₅) didesniu panaudojimu. Tai rodo, kad šio šlaito dirvožemis yra silpniau veikiamas erozijos, nes viršutinėje šio šlaito dalyje yra 1,9 karto didesnis vandenyje patvarių agregatų kiekis, palyginus su šių agregatų kiekiu atitinkamoje statesniojo šlaito dalyje, todėl mažiau fosforo junginių nusiplauna šlaitu žemyn. Skirtingo statumo šlaituose esantis nevienodas neorganinio fosforo kiekis, gali būti susijęs su skirtinga dirvožemio granulimetrine ir mineralogine sudėtimi bei sėjomainos augalų augimo intensyvumu. Abiejų kalvų šlaituose nežymiai didesnis organinės anglies ir organinio fosforo kiekis

apatinėje šlaito dalyje rodo, kad šioje dalyje vyksta minėtų junginių akumuliacija dėl nusiplovimo iš viršutinės šlaito dalies.

Fosforo junginių pasiskirstymas skirtingo dydžio agregatuose. Fosforo junginių valdymui sistemoje dirvožemis-vanduo svarbią reikšmę turi fosforo junginių pasiskirstymas ne tik atskirose šlaito dalyse, bet ir šių dirvožemių skirtinguose agregatų dydžiuose. Wright (2009) nustatė, kad didžioji dalis judraus fosforo (Fe-P, Al-P ir Ca-P) yra susitelkusi smulkiuose ultra-mikroagregatuose (<0,0053mm), o organinio fosforo (huminių-fulvinių rūgščių fosforo) daugiau būna agregatuose >0,25mm. Kituose tyrimuose nustatyta, kad daugiau tirpaus augalams prieinamo organinio ir neorganinio fosforo būna susitelkę agregatuose >1,0 mm ir <0,25 mm, negu 0,25–1,0 mm agregatuose (Li ir Ge, 2015). Šiame tyrime nustatyta, kad daugiau organinio fosforo yra susitelkę 5,0–3,0 makroagregatuose mažesnio statumo (7–9°) šlaito viršutinėje dalyje, palyginus su jo kiekiu statesniojo (9–11°) šlaito viršutinėje dalyje (18 pav.).



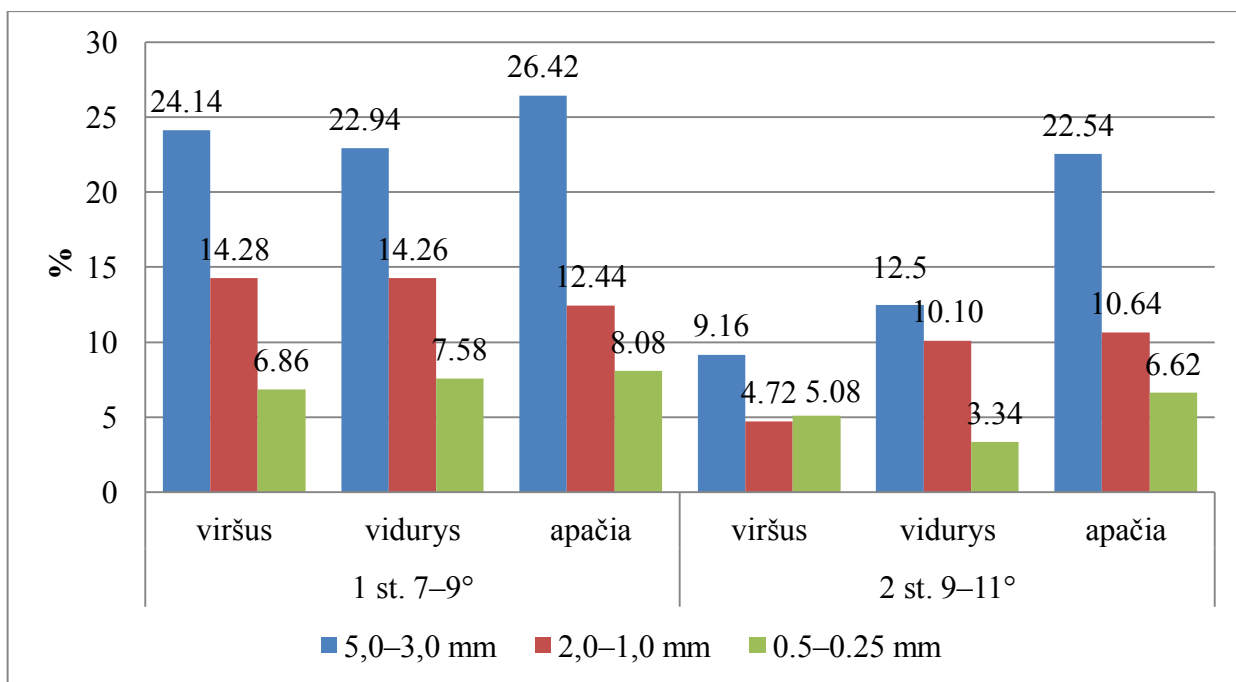
18 pav. Organinio (O) fosforo ir neorganinio (N) fosforo (mg kg⁻¹) kiekių pasiskirstymas kalvos šlaito dirvožemio skirtingo dydžio agregatuose

Mažesnio statumo šlaito viršutinėje dalyje organinio fosforo kiekis mezoagregatuose 2,0–1,0 ir 0,5–0,25 mm nustatytas dvigubai didesnis nei statesniojo šlaito atitinkamoje dalyje, ir tai siejama su

didesniu organinės medžiagos kiekiu mažesnio statumo šlaito dirvožemyje. Viršutinėje abiejų šlaitų dalyje organinio fosforo nežymiai daugiau buvo 2,0–1,0 mm dydžio agregatuose. Vidurinėje ir apatinėje (akumuliacinėje) šlaito dalyse, ypač statesniajame šlaite labiau išryškėjo organinio fosforo susikaupimas mažuose (0,5–0,25 mm) mezoagregatuose.

Neorganinio fosforo nežymiai didesni kiekiai nustatyti statesniojo šlaito dirvožemyje, palyginus su mažesnio statumo šlaite esančiu kiekiu. Jeigu šios fosforo formos kiekis viršutinėje šlaito dalyje nežymiai didesnis buvo 2,0–1,0 mm mezoagregatuose, tai ši tendencija nebeišryškėjo vertinant neorganinio fosforo kiekius vidurinėje ir apatinėje šlaito dalyse.

Apibendrinant gautus duomenis galima teigti, kad labiau eroduojamoje viršutinėje šlaito dalyje organinis ir neorganinis fosforas turi tendenciją kauptis 2,0–1,0 mm dydžio mezoagregatuose, kurie šiuose dirvožemiuose sudaro 14,28 % 1 stacionare ir 4,72 % 2 stacionare (19 pav.). Šių agregatų mažesnis ardymas ar jų patvarumo didinimas yra vienas iš būdų mažinant fosforo nuostolius kalvoto reljefo dirvožemyje. Patvarių mezoagregatų formavimo atžvilgiu kalvos šlaito dirvožemyje, daugiamečių žolynas yra pranašesnis nei dirbamas dirvožemis javų sėjomainoje su juodoju pūdymu.



19 pav. Dirvožemio agregatų kiekis skirtingo statumo šlaituose, 2019 m.

Dirvožemyje, kuriame daugiau nei 15 metų augo daugiamečių žolynas, mažesnio statumo (7–9°) šlaito viršutinėje dalyje vandenyje patvarių agregatų >0,25 mm kiekis buvo 1,9 karto didesnis, o

statesniojo (9–11°), šlaito viršutinėje dalyje 2,8 karto didesnis, palyginus su lauko augalų (javų su užimtu pūdymu) sėjomaina (7 lent.).

7 lentelė. Dirvožemio $C_{org.}$ ir patvarių agregatų $> 0,25$ mm kiekis atskirose skirtingo statumo šlaitų dalyse taikant skirtingo intensyvumo agropriemonės, 2019 m., ($x \pm Sx$)

stacionaras	laukelis	šlaito dalis	$C_{org.}, \%$	Agregatų $>0,25$ mm kiekis, $\%$
1 st. (7–9°)	lauko augalų sėjomaina	viršus	$0,97 \pm 0,02$	$35,91 \pm 2,11$
		vidurys	$1,10 \pm 0,04$	$21,32 \pm 1,91$
		apačia	$1,18 \pm 0,05$	$27,93 \pm 2,06$
	netrešiamas, nešienaujamas žolynas	viršus	$1,52 \pm 0,10$	$66,66 \pm 3,11$
		vidurys	$1,75 \pm 0,90$	$70,23 \pm 2,98$
		apačia	$1,79 \pm 0,11$	$55,91 \pm 1,17$
2 st. (9–11°)	lauko augalų sėjomaina	viršus	$0,40 \pm 0,01$	$19,17 \pm 1,11$
		vidurys	$0,62 \pm 0,02$	$36,43 \pm 1,79$
		apačia	$0,73 \pm 0,02$	$27,65 \pm 2,19$
	netrešiamas, nešienaujamas žolynas	viršus	$1,06 \pm 0,05$	$54,32 \pm 2,63$
		vidurys	$1,27 \pm 0,07$	$66,27 \pm 2,27$
		apačia	$1,27 \pm 0,07$	$70,15 \pm 2,88$

Pastaba: x – imties vidurkis, Sx – vidurkio paklaida

Šis patvarių agregatų kiekio padidėjimas yra susijęs su organinės anglies kiekio padidėjimu viršutiniame 0–10 cm dirvožemio sluoksnyje ilgalaikiame žolyne abiejuose tirtuose šlaituose.

REZULTATŲ APITARIMAS

Įvertinus fosforo junginių pokyčius kalvoto reljefo dirvožemiuose (Žemaičių aukštumoje, Vakarinės Lietuvos dalyje) ir jų nusiplovimo intensyvumą, priklausomai nuo taikytų agropriemonių ir klimatinėms sąlygoms, nustatyta, kad fosfatų (PO_4) nuostoliai yra mažiausi laukelyje, apželdintame ilgalaikiais žolynais, kuriuose susiformavusi stipri velėna apsaugo dirvožemio paviršių nuo ardymo. O šlaituose vyrauja ta pati tendencija – lauko augalų sėjomainoje tiek nutekėjusio vandens kiekiai, tiek fosfatų (PO_4) nuostoliai yra didesni nei daugiamečių žolių lauke (skirtumai siekia nuo 1,65 iki 13,86 kartų). Gautieji duomenys rodo, kad nutekėjusio šlaitu vandens kiekis priklauso ne tik nuo kritulių kiekio ar jų intensyvumo, bet ir nuo auginamų augalų. Taip pat nustatyta, kad nuo 9–11° šlaito vidutiniškai netenkama daugiau fosfatų (PO_4) ($0,40 \text{ mg l}^{-1}$) nei nuo 7–9° šlaito ($0,15^{**} \text{ mg l}^{-1}$). Šie rezultatai atitinka ir I. Kinderienės tyrimuose (2011, 2012, 2013) gautas nutekėjusių vandens kiekių bei fosfatų (PO_4) nuostolių tendencijas.

Tyrimų duomenys abiejuose stacionaruose parodo, kad fosforo junginių netekimas dėl vandeninės erozijos bei augalijos, kaip svarbiausio priešerozinio veiksnio, glaudžiai siejasi su granulimetrine dirvožemio sudėtimi, šlaito polinkio kampui bei kritulių kiekiu. Tokius rezultatus, pagrįstus tyrimų duomenimis, pateikė ir kitų šalių garsūs erozijos tyrėjai Collins (2004), Easton (2005), Li (2018) ir kt.

Įvertinus fosforo junginių pokyčius dirvožemyje ir jų nuostolius su vandens bei dirvožemio nuotėkiu, priklausomai nuo kalvos šlaito statumo ir taikytų agropriemonių, nustatytas, jog didžiausi nutekėjusio vandens ($230,00 \text{ l}$) bei fosfatų (PO_4) ($0,32 \text{ mg l}^{-1}$) kiekiai buvo nuo statesniojo 9–11° kalvos šlaito užimto sėjomainos augalais. O daugiausia dirvožemio ir judriojo fosforo (P_2O_5) netekta nuo statesniojo šlaito (9–11°), kurio dirvožemis lengvos granulimetrinės sudėties (rišlus smėliš-smėlingas lengvas priemolis). Pagrindė buvo nuplautas dirvožemis, kurį sudarė net ~74 % smėlis, o atsparios dulkių ir molio dalelės sudarė atitinkamai tik ~19 % ir 7 %. Taip pat nustatyta, jog daugiau su nutekėjusiu dirvožemio yra prarandama neorganinio fosforo, palyginus su organinio fosforo kiekiu. Šie rezultatai atsispindi ir kitų mokslininkų darbuose (Wang et al., 2001; Li et al., 2017; Liu et al., 2018).

Įvertinus dirvožemio organinio, neorganinio ir judriojo fosforo (P_2O_5) kiekius atskirose kalvos šlaito dalyse, javų su juodu pūdymu sėjomainoje, skirtingo statumo šlaituose, nustatyta, kad ypatingai mažai ($0,15 \text{ mg kg}^{-1}$) organinio fosforo yra šlaito viršutinėje dalyje. Šio šlaito dirvožemyje mažas organinės anglies ir organinio fosforo kiekis, o priešingai didelis augalams prieinamo judriojo fosforo (P_2O_5) kiekis ($141\text{--}195 \text{ mg kg}^{-1}$) rodo, kad sėjomainos augalai, dėl drėgmės trūkumo, neužaugina

gausios šaknų sistemos, kuri papildytų organinės anglies atsargas dirvožemyje, o užaugantis sėjomainos augalų derlius nesunaudoja judriojo fosforo (P_2O_5), kuris turi tendenciją šiame dirvožemyje kauptis ir nusiplauti šlaitu žemyn esant intensyviems krituliams. Abiejų kalvų šlaituose nežymiai didesnis organinės anglies ir organinio fosforo kiekis apatinėje šlaito dalyje rodo, kad šioje dalyje vyksta minėtų junginių akumuliacija dėl nusiplovimo iš viršutinės šlaito dalies. Tokia organinio fosforo nusiplovimo šlaitu tendencija vyrauja ir tyrėjų Wright (2009), Li (2018) ir Reid (2018) darbuose.

Įvertinus fosforo junginių pasiskirstymą skirtinguose agregatuose nustatyta, kad labiau eroduojamoje viršutinėje šlaito dalyje organinis ir neorganinis fosforas turi tendenciją kauptis 2,0–1,0 mm dydžio mezoagregatuose, kurie šiuose dirvožemiuose sudaro 14,28 % 1 stacionare ir 4,72 % 2 stacionare. Kituose tyrimuose nustatyta, kad daugiau tirpaus augalams prieinamo organinio ir neorganinio fosforo būna susitelkę agregatuose $>1,0$ mm ir $<0,25$ mm, negu 0,25–1,0 mm agregatuose (Li ir Ge, 2015).

IŠVADOS

1. Fosforo junginių netekimas iš agroekosistemos dirvožemio priklausė nuo kalvos šlaito statumo ir jame augusių augalų. Su nuotėkiu nuo 9–11° kalvos šlaito netenkama ~3 kartus daugiau fosfatų (PO_4) ($0,40 \text{ mg l}^{-1}$) nei nuo mažesnio statumo 7–9° šlaito ($0,15 \text{ mg l}^{-1}$). Fosfatų (PO_4) nuostoliai su šlaitu nutekėjusiu vandeniu ~2 kartus didesni šlaite padengtame sėjomainos augalais ($0,37 \text{ mg l}^{-1}$), kur kasmet atliekamas žemės dirbimas, nei šlaite padengtame daugiametėmis žolėmis ($0,18 \text{ mg l}^{-1}$).
2. Gausių kritulių (15,70 mm) metu (2019 m.) mažiausias (3,00 l) nutekėjusio vandens kiekis buvo 7–9° kalvos šlaite, kuriame augo daugiametės žolės, o didžiausias (230,00 l) nuotėkis nustatytas 9–11° kalvos šlaite, kuriame augo sėjomainos augalai. Fosfatų (PO_4) nuostoliai 9–11° šlaite užimtame sėjomainos augalais sudarė $0,32 \text{ mg l}^{-1}$ ir buvo 28 % didesnis nei to paties statumo šlaite, kuriame augo daugiametės žolės.
3. Su nuotėkiu daugiausia nuplauta dirvožemio (242,0 kg) ir judriojo fosforo (P_2O_5) ($207,0 \text{ mg kg}^{-1}$) nuo statesniojo (9–11°) kalvos šlaito, kurio dirvožemis lengvos granulimetrinės sudėties (rišlus smėlis - vidutinio sunkumo priemolis) užimtas sėjomainos augalais su juoduoju pūdymu. Dirvožemio ir fosforo junginių nuostolių nenustatyta mažesnio statumo (7–9°) kalvos šlaite užimtame daugiametėmis žolėmis.
4. Lauko augalų sėjomainoje su juoduoju pūdymu organinio ir neorganinio bei judriojo fosforo (P_2O_5) kiekiai skirtingo statumo šlaituose ir atskirose šlaito dalyse buvo nevienodi. Didžiausias ($0,31 \text{ mg kg}^{-1}$) organinio fosforo kiekis nustatytas mažesnio (7–9°) statumo kalvos šlaito apatinėje akumuliacinėje dalyje, kurios dirvožemyje vyrauja molio frakcija. Priešingai, judriojo fosforo (P_2O_5) didžiausi kiekiai ($189,00$ ir $195,00 \text{ mg kg}^{-1}$) nustatyti statesniojo (9–11%) šlaito viršutinėje ir vidurinėje dalyse, kurių dirvožemis - rišlaus smėlis, ir tai siejama su šio dirvožemio maža drėgmės sorbcija, blogu augalų augimu ir mažu judriojo fosforo panaudojimu.
5. Labiau eroduojamoje viršutinėje šlaito dalyje organinis ir neorganinis fosforas turi tendenciją kauptis 2,0–1,0 mm dydžio mezoagregatuose, kurie šiuose dirvožemiuose sudaro 14,28 % ir 4,72 %. Šių agregatų kiekio ir patvarumo vandens poveikiui didinimas yra vienas iš būdų mažinant fosforo nuostolius kalvoto reljefo dirvožemyje. Šiuo atžvilgiu daugiametis žolynas yra pranašesnis nei sėjomainos augalai su juoduoju pūdymu.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Adomaitis T., Tripolskaja L. 2010. Antropogeninis poveikis cheminių elementų išplovimui iš dirvožemio. Agroekosistemų komponentų valdymas. Ilgalaikių agrocheminių tyrimų rezultatai. Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centras, p. 280–281.
2. Arustienė J. ir kt. 2011. Teršalų prietaka į Kuršių marias. Aplinkos būklė 2010. Tik faktai, p. 56.
3. Bogužas V., Arvasas J., Šniauka P. 2013. Žemdirbystė. Vadovėlis, Aleksandro Stulginskio universitetas, Agronomijos fakultetas, Agroekosistemų ir dirvožemio mokslų institutas, p. 50–53.
4. Bučienė A., Antanaitis Š., Mašauskienė A., Šimanskaitė D. 2007. Nitrogen and phosphorus losses with drainage runoff and field balance as a result of crop management. Communications in Soil Science and Plant Analysis, Vol. 38, Issue 15–16, p. 2177–2195.
5. Bučienė A., Povilaitis A. V., Langas V., Bučas M., Petkuvienė J., Vaičiūtė D., Gužys S. 2019. Changes in nutrient concentrations of two streams in Western Lithuania with focus on shrinkage of agriculture and effect of climate, drainage runoff and soil factors. Water, 11, p. 1–17.
6. Choudhary D. K., Varma A., Tuteja N. 2017. Phosphate solubilization. Mycorrhiza – Function, Diversity, State of the Art, p. 66.
7. Collins D. B. G., Bras R. L., Tucker G. E. 2004. Modeling the effects of vegetation-erosion coupling on landscape evolution. Journal of Geophysical Research, earth Surface, Vol. 109, Is. F3, p. 1–11.
8. Cui H., Ou Y., Wang L., Yan B., Han L., Li Y. 2019. Change in the distribution of phosphorus fractions in aggregates under different land uses: a case in Sanjiang Plain, Northeast China. International journal of Environmental Research and Public Health, 16(2), p. 212.
9. Easton Z. M., Petrovic A. M. 2005. Effect of hill slope on nutrient runoff from turf. Geology, p. 109–113.
10. Europos bendrijos. 2019. Vandens erozija ir tankinimas. Tvari žemdirbystė ir dirvožemio apsauga. Informacinis leidinys Nr. 2. Prieiga per internetą: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/SOCO/FactSheets/LT%20Fact%20Sheet.pdf> [žiūrėta 2019 m. gruodžio 11 d.].

11. Europos Komisija. 2013. Komisijos komunikatas Europos parlamentui, tarybai, Europos ekonomikos ir socialinių reikalų komitetui ir regionų komitetui. Konsultacinis komunikatas dėl fosforo tvaraus naudojimo, p. 2–3.
12. Falconer H. M. 2014. The phosphorus cycle: An introduction. *Visionlearning*, Vol. EAS-3(1).
13. Gonzalez Medeiros J. J., Perez Cid B., Fernandez Gomez E. 2005. Analytical phosphorus fractionation in sewage sludge and sediment sample. *Anal Bioanal Chem*, 381, p. 873–878.
14. Grizzetti B., Bouraoui F., Aloe A. 2012. Changes of nitrogen and phosphorus loads to European seas. *Global Change Biology*, Vol. 18, No. 2, p. 769–782.
15. Grubliauskas R., Bradulienė J. 2018. Paviršinių vandens telkinių tyrimų atlikimas. Tarpinė ataskaita, p. 5–28.
16. Gužys S. 1999. Žemės ūkio augalų derliaus ryšio su žemdirbystės sistemomis, dirvožemio ir vandens rodikliais analizė. Daktaro disertacija, p. 5–10.
17. Gužys S., Petrokienė Z. 2006. Skirtingai tręštų sėjomainos kultūrinių augalų įtaka fosforo migracijai agroekosistemoje. *Žemdirbystė. Mokslo darbai*, T. 93, Nr. 3, p. 75–88.
18. Hassan W. F. 2013. The nitrogen and phosphate forms in water of Shatt Al-Arab River in Basra/Iraq. *Marsh Bulletin*, 8(2), p. 182–192.
19. He Z. L., Wilson M. J., Campbell C. O., Edwards A. C., Chapman S. J. 1995. Distribution of phosphorus in soil aggregate fractions and its significance with regard to phosphorus transport in agricultural runoff. *Water, Air, and Soil Pollution*, 83, p. 69–84.
20. Jakienė E., Spruogis. V. 2015. Biologinių preparatų ir bioorganinių trąšų naudojimas cukrinių runkelių pasėliuose. *Žemės ūkio mokslai*, T. 22, Nr. 3, p. 107–120.
21. Jankauskas B., Jankauskienė G. 2006. Kiekybiniai eroduojamų dirvožemių organinės medžiagos pokyčiai dėl skirtingo žemės naudojimo. *Žemės ūkio mokslai*, Nr. 4, p. 1–10.
22. Jankauskas B. 1989. Tręšimas ir aplinkos tarša. Lietuvos gamtos apsaugos draugija. Lietuvos TSR žemės ūkio ministerija, p. 3–15.
23. Jankauskas B. 1994. Dirvožemių erozija ir priešerozinės agropriemonės. Lietuvos žemdirbystės institutas, p. 4–79.
24. Jankauskas B. 1996. Dirvožemio erozija, p. 7–36.
25. Jankauskas B. 2008. Antieroziniai tyrimai Lietuvoje ir COST 634 veikla. Lietuvos žemdirbystės institutas, Kaltinėnų bandymų stotis.

26. Jeschke M. 2017. Phosphorus behavior in soil. Prieiga per internetą: https://intelseed.ca/uploads/Phosphorus_Behavior_in_Soil-2017.pdf [žiūrėta 2019 m. gruodžio 11 d.].
27. Jodaugienė D. 2017. Ekologinės gamybos ūkių aprūpinimas maisto medžiagomis: natūralios, gyvulinės ir augalinės kilmės trąšos, ūkio NPK (azoto, fosforo, kalio) balansas. Žemės ūkio, maisto ūkio ir žuvininkystės mokslinių tyrimų taikomosios veiklos programa, galutinė ataskaita.
28. Jodaugienė D., Bogužas V., Mikučionienė R., Auželienė I., Zemeckis R. 2015. Sėjomainų ir priešsėlių poveikis su auginamų javų derliumi išnešamų maisto medžiagų kiekiui. *Žemės ūkio mokslai*, T. 22, Nr. 1, p. 26–35.
29. Jokubauskaitė I., Karčauskienė D., Antanaitis Š., Mažvila J., Šlepetienė A., Končius D. 2015. The distribution of phosphorus forms and fractions in Retisol under different soil liming management. *Zemdirbyste-Agriculture*, Vol. 102, No. 3, p. 251–256.
30. Kinderienė I. 2011. Dirvožemio erozija ir priešerozinės technologijos Žemaitijos kalvose. Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centras.
31. Kinderienė I. 2012. Aplinkai saugaus tręšimo mineralinėmis ir organinėmis trąšomis skirtingo statumo šlaituose tyrimai. Galutinė ataskaita, p. 3.
32. Kinderienė I., Jarašiūnas G., Karčauskienė D. 2013. Augalų maisto medžiagų (N, P, K) nuo kalvų šlaitų praradimas su dirvožemiu ir vandeniu. *Žemės ūkio mokslai*, T. 20, Nr. 1, p. 10–19.
33. Kinderienė I., Karčauskienė D. 2012. Effects of different crop rotations on soil erosion and nutrient losses under natural rainfall conditions in Western Lithuania. *Acta Agriculturae Scandinavica*, Section B – Soil and Plant Science, 62(2), p. 199–205.
34. Kleinman P. A., Sharpley A., McDowell R, Flaten D, Buda A., Tao L., Bergstrom L., Zhu Q. 2011. Managing agricultural phosphorus for water quality protection: principles for progress. *Plant and Soil*, 349, p. 169–182.
35. Klimaitė I., Tamošaitis J. 1980. Lietuvos TSR ežerų eutrofikacijos problemos (Trakų ežerų pavyzdžiu. Lietuvos TSR geografinė draugija, geografinis metraštis, XVIII t., p. 13–18.
36. Kruse J. et al. 2015. Innovative methods in soil phosphorus research: A review. *J. Plant Nutr. Soil Sci*, 178, p. 43–88.
37. Li B. et al. 2016. Phosphorus content as a function of soil aggregate size and paddy cultivation in highly weathered soils. *Environ Sci Pollut Res Int*. 23(8), p. 494–503.

38. Li T., Cu Ch., Zhang Y., Ju M., Wang Y. 2017. Contrasting eutrophication risks and countermeasures in different water bodies: assessments to support targeted watershed management. *Int J Environ Res Public Health*, 14(7), p. 695.
39. Li X., Wang B., Yang T., Zhu D., Nie Z., Xu J. 2018. Identification of soil P fractions that are associated with P loss from surface runoff under various cropping systems and fertilizer rates on sloped farmland. *Plos One* 13(1). Prieiga per internetą: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0179275#amendment-0> [žiūrėta 2019 m. gruodžio 22 d.].
40. Lietuvos gamtos fondas. 2019. Eutrofikacija. Prieiga per internetą: <https://www.glis.lt/?pid=64> [žiūrėta 2019 m. gruodžio 11 d.].
41. Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba. 2019. Krituliai. Prieiga per internetą: <http://www.meteo.lt/lt/krituliai> [žiūrėta 2019 m. gruodžio 11 d.].
42. Liu J. et al. 2018. Long-term land use affects phosphorus speciation and the composition of phosphorus cycling genes in agricultural soils. Prieiga per internetą: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2018.01643/full> [žiūrėta 2019 m. gruodžio 11 d.].
43. Malav J. K., Patel K. C., Meena O. P., Mor V. B., Chaudhary A. N. 2015. Status of available nutrients (P, K, S and Na) in soils as influenced by silicon fertilization in rice (*oryza sativa*) in typic Ustochrepts soil. *Ecology, Environment and Conversation Paper*, Vol. 21, p. 149–152.
44. Maranguit D., Guillame T., Kuzyakov Y. 2017. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. *Catena* 149, p. 385–393.
45. Mažvila J. 1998. Lietuvos dirvožemių agrocheminės savybės ir jų kaita. Monografija. Lietuvos žemdirbystės institutas.
46. Mažvila J. 2009. Projekto „Priemonių vandensaugos tikslams siekti galimybių studijos parengimas“ 11 dalies „Rekomendacijų žemės ūkio teritorijų erozijos mažinimui ir efektyviam geros ūkininkavimo praktikos priemonių įgyvendinimui parengimas, siekiant sumažinti vandens telkinių taršą“. Tarpinė ataskaita, p. 2–7.
47. Mažvila J. ir kt. 2005. Fosforo tyrimai skirtingais metodais ir jų tinkamumas Lietuvos dirvožemiams. *Žemdirbystė. Mokslo darbai*, T. 92, Nr. 4, p. 20–35.
48. Mažvila J., Adomaitis T. 2005. Judriųjų fosforo ir kalio kiekių kaita Lietuvos žemės ūkio naudmenų dirvožemiuose. *Žemdirbystė*, T. 91, Nr. 3, p. 3–26.

49. McDowell R. W., Sharpley A. N., Condon L. M., Haygarth P. M., Brookes P. C. 2001. Phosphorus loss from land to water: integrating agricultural and environmental management. *Plant Soil*, 237, p. 287–307.
50. Mekonnen M. M., Hoekstra A. Y. 2017. Global anthropogenic phosphorus loads to freshwater and associated grey water footprints and water pollution levels: A high-resolution global study. *Water Resources Research*, 53, p. 1–14.
51. Mueller D. K., Helsel D. R. 1996. Nutrients in the nation's waters – too much of a good thing? U. S. Geological Survey Circular 1136, p. 2–8.
52. Mugauskienė V. 2017. Erozijos grėsmė mūsų dirvožemiams. *Agroakademija.lt*. Prieiga per internetą: <http://www.agroakademija.lt/Straipsniai/StraipPerziura?StraipsnisID=1116&TemaID=1> [žiūrėta 2019 m. gruodžio 11 d.].
53. Oram B. 2014. Phosphate in surface water streams lakes. Water Research Center. Prieiga per internetą: <https://water-research.net/index.php/phosphate-in-water> [žiūrėta 2019 m. gruodžio 11 d.].
54. Orenda Technologies. 2017. Different types of phosphates. Prieiga per internetą: <https://blog.orendatech.com/different-phosphates> [žiūrėta 2019 m. gruodžio 11 d.].
55. Povilaitis A. 2004. Phosphorus trends in Lithuania rivers affected by agricultural non-point pollution. *Environmental Research, Engineering and Management*, No. 4(30), p. 17–27.
56. Povilaitis A. 2006. Impact of agriculture decline on nitrogen and phosphorus loads in Lithuania rivers. *Ekologija*, Nr. 1, p. 32–39.
57. Račinskas A. 1958. Dirvožemio erozijos veiksniai Rytų Lietuvos aukštumose. *Geografinis metraštis* 1, p. 253–265.
58. Rocha Junior P. R., Ribeiro P. H., Mesquita L. F., Andrade F. V., Sa Mendonca E. 2018. Distribution of C and inorganic phosphorus fractions in different aggregate sizes under forestry, agroforestry system and pasture. *J. Soil Sci. Plant Nutr*, Vol. 18, No. 2.
59. Sardi K., Csatho P. 2002. Studies on the phosphorus retention of different soil types in a pot experiment with Perennial Ryegrass. *Agrokemia es Talajtan*, 51, 1–2, p. 177–184.
60. Schoumans O. F., Bouraoui F., Oenema O., van Dijk K. C. 2015. Phosphorus management in Europe in a changing world. *AMBIO* 44(2), p. 180–192.
61. Sheppard S. C., Racz G. J. 1984. Effects of soil temperature on phosphorus extractability. Extractions and plant uptake of soil and fertilizer phosphorus. *Can. J. Soil Sci.* 64, p. 241–254.

62. Sileika A. S., Haneklaus S., Gaigalis K., Kutra S. 2003. Impact of agrarian reform on nutrient run-off in Lithuania. *Landbauforschung Volkenrode*, 53 2/3, p. 171–179.
63. Song C., Zhang X., Liu X., Chen Y. 2012. Effect of soil temperature and moisture on soil test P with different extractants. *Can. J. Soil Sci.* 92, p. 537–542.
64. Staniszevska M., Chomacka K. 2017. Ūkio našumo gerinimas, užkertant kelią azoto ir fosforo išplovimui iš dirvožemio į vandenį. *Polski Klub Ekologiczny. Coalition Clean Baltic*. Prieiga per internetą: <https://ccb.se/wp-content/uploads/2018/03/wise-nutrient-management-lt.pdf> [žiūrėta 2019 m. gruodžio 11 d.].
65. Staugaitis Ž. 2018. Dirvožemio kokybei svarbių anglies ir azoto junginių sudėtis ir pokyčiai auginant daugiamečius žolinius energetinės paskirties augalus. *Daktaro disertacija*, p. 34–36.
66. Steiner F. et al. 2012. Phosphorus and potassium balance in soil under crop rotation and fertilization. *Semina: Ciencias Agrarias, Londrina*, Vol. 33, No. 6, p. 2173–2186.
67. Taminskas J., Linkevičienė R., Šimanauskienė R. 2006. Fosforo šaltiniai ir nuotėkis Žuvinto baseine. *Annales Geographicae* 39(1) t., 25–33.
68. Thi Bich Thao H., George T., Yamakawa T., Widowati L. R. 2008. Effects of soil aggregate size on phosphorus extractability and uptake by rice (*Oryza sativa* L.) and corn (*Zea mays* L.) in two Ultisols from the Philippines. *Soil Science and Plant Nutrition*, 54:1, p. 148–158.
69. Tripolskaja L. 1994. Organinių trąšų įtaka lengvų dirvožemio derlingumui bei maisto medžiagų išplovimui. *Žemės ūkio mokslai*, Nr. 1, p. 34–37.
70. Ulen B., Djodjic F., Bučienė A., Mašauskienė A. 2012. Phosphorus load from agricultural land to the Baltic sea. *Ecosystem Health and Sustainable Agriculture*, No. 1, p. 82–101.
71. Uzoho B. U. 2018. Phosphorus concentrations in grain size fractions of low-land soils of Egbema, Southeastern Nigeria. *London Journal of Research in Science: Natural and formal*, Vol. 18, Is. 1, Comp. 1.0.
72. Vadiunina A. P., Korchagina Z. A. 1986. Methods for determining the physical properties of the soil. *Moscow: Agropromizdat*, p. 53–79.
73. Vaišvila Z., Arbačiauskas J., Mažvila J. 2002. Pagrindinės augalų maisto medžiagos skirtingos genėzės dirvožemiuose. *Žemės ūkio mokslai*, Nr. 3, p. 3–13.
74. Van Rossum T. 2015. Sources of phosphorus. Prieiga per internetą: <https://www.london.ca/residents/Environment/Rivers-Creeks/Pages/Sources-of-Phosphorus.aspx> [žiūrėta 2019 m. gruodžio 11 d.].

75. Verheyen D. et al. 2015. Dissolved phosphorus transport from soil to surface water in catchments with different land use. *AMBIO* 44, p. 228–240.
76. Veršulienė A. 2017. Ilgalaikiai dirvožemio savybių pokyčiai skirtingose agroekosistemose ir jų kompleksinė įtaka agroekocenozei. Daktaro disertacija, p. 144–145.
77. Visockis O. 1971. Dirvožemio erozija, p. 1–15.
78. Wang X., Yost R. S., Linnquist B. A. 2001. Soil aggregate size affects phosphorus desorption from highly weathered soils and plant growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, p. 139–146.
79. Wright A. L. 2009. Phosphorus sequestration in soil aggregates after long-term tillage and cropping. *Soil and Tillage Research*, 103, p. 406–411.
80. Žėkaitė V. ir kt. 2015. Ekologinio trėšimo įtaka NPK balansui ir maisto medžiagų dinamikai dirvožemyje. *Žemės ūkio mokslai*, T. 22, Nr. 1, p. 44–55.
81. Zheng Z. M., Zhang T. Q. 2012. Soil phosphorus tests and transformation analysis to quantify plant availability: A review. *Soil Fertility Improvement and Integrated Nutrient Management – A Global Perspective*, p. 19–36.

PRIEDAI

1 priedas

1 lentelė. Skirtingo dydžio agregatų procentinė dalis nuo bendros dirvožemio masės

Stacionaras, agropriemonė	Šlaido dalis	>10 mm (%)			5–3 mm (%)			3–2 mm (%)			2–1 mm (%)			1–0,5 mm (%)		
		g			g			g			g			g		
1 st., 4 lauk.	viršus	66,27	7,35	3,67	217,66	24,14	12,07	157,42	17,46	8,73	128,71	14,27	7,14	176,73	19,60	9,80
	vidurys	25,30	2,82	1,41	205,66	22,93	11,47	188,19	20,98	10,49	127,85	14,26	7,13	176,10	19,64	9,82
	apačia	40,10	4,57	2,29	231,60	26,42	13,21	166,56	19,00	9,50	109,01	12,43	6,22	158,40	18,07	9,03
1 st., 5 lauk.	viršus	31,94	3,55	1,78	257,89	28,68	14,34	198,23	22,04	11,02	131,53	14,63	7,31	153,58	17,08	8,54
	vidurys	18,72	2,08	1,04	184,13	20,44	10,22	222,89	24,75	12,37	163,96	18,20	9,10	175,72	19,51	9,76
	apačia	25,67	2,89	1,45	166,20	18,73	9,37	209,14	23,57	11,79	160,56	18,10	9,05	183,35	20,66	10,33
2 st., 4 lauk.	viršus	6,64	3,03	1,52	20,07	9,17	4,58	29,57	13,51	6,75	10,31	4,71	2,36	31,24	14,27	7,14
	vidurys	18,60	6,14	3,07	37,88	12,50	6,25	52,89	17,46	8,73	30,61	10,10	5,05	45,46	15,00	7,50
	apačia	50,95	8,32	4,16	138,00	22,55	11,27	116,23	18,99	9,50	65,14	10,64	5,32	109,97	17,97	8,98
2 st., 5 lauk.	viršus	–	–	–	6,21	2,13	1,06	23,77	8,14	4,07	26,80	9,17	4,59	78,58	26,90	13,45
	vidurys	1,22	0,36	0,18	7,85	2,33	1,16	26,25	7,77	3,89	25,83	7,65	3,83	91,33	27,05	13,52
	apačia	3,52	0,65	0,33	27,75	5,15	2,58	58,25	10,81	5,41	73,12	13,57	6,79	156,26	29,00	14,50

Stacionaras, agropriemonė	Šlaido dalis	g	0,5–0,25 mm (%)			<0,25 mm (%)		Viso	Makro dalelės	Mezo dalelės	Mikro dalelės	Struktūringumo koeficientas
			g			g						
1 st., 4 lauk.	viršus	61,94	6,87	3,43	93,10	10,32	5,16	901,83	28,39	61,79	9,82	1,62
	vidurys	68,07	7,59	3,79	105,70	11,79	5,89	896,87	23,10	66,59	10,32	1,99
	apačia	70,85	8,08	4,04	100,15	11,42	5,71	876,67	27,17	60,50	12,33	1,53
1 st., 5 lauk.	viršus	52,26	5,81	2,91	73,82	8,21	4,11	899,25	28,98	60,94	10,08	1,56
	vidurys	51,84	5,76	2,88	83,44	9,26	4,63	900,70	20,29	69,79	9,93	2,31
	apačia	52,66	5,89	2,94	90,13	10,16	5,08	887,31	19,19	69,54	11,27	2,28
2 st., 4 lauk.	viršus	11,12	5,08	2,54	109,95	50,23	25,11	218,90	2,67	19,22	78,11	0,24
	vidurys	10,12	3,34	1,67	107,42	35,45	17,73	302,98	5,65	24,65	69,70	0,26
	apačia	40,48	6,61	3,31	91,31	14,92	7,46	612,08	18,90	42,31	38,79	0,52
2 st., 5 lauk.	viršus	38,16	13,06	6,53	118,62	40,60	20,30	292,14	0,62	28,59	70,79	0,40
	vidurys	43,50	12,88	6,44	141,67	41,96	20,98	337,65	0,91	32,86	66,24	0,49
	apačia	69,21	12,85	6,42	150,64	27,96	13,98	538,75	3,13	50,75	46,13	1,03

2 priedas

1 lentelė. Skirtingo dydžio agregatų patvarumas vandenyje (šlapias sijojimas)

Stacionaras, agropriemonė	Šlaito dalis	>3 mm					3–2 mm					2–1 mm				
		Biukso nr.	Svoris su žemėm	Tuščio biukso svoris	Natūralaus dirvožemio svoris		Biukso nr.	Svoris su žemėm	Tuščio biukso svoris	Natūralaus dirvožemio svoris		Biukso nr.	Svoris su žemėm	Tuščio biukso svoris	Natūralaus dirvožemio svoris	
1 st., 4 lauk.	viršus	16	32,70	32,02	0,68	1,36	16a	33,46	32,79	0,67	1,34	17	34,57	31,25	3,32	6,64
	vidurys	18a	31,62	31,14	0,48	0,96	19	31,06	30,86	0,20	0,40	19a	33,49	32,63	0,86	1,72
	apačia	21	32,31	32,11	0,20	0,40	21a	33,44	33,04	0,40	0,80	22	30,78	29,74	1,04	2,08
1 st., 5 lauk.	viršus	23a	48,37	31,45	16,92	33,84	24	35,37	31,92	3,45	6,90	24a	39,16	32,44	6,72	13,44
	vidurys	26	52,53	31,99	20,54	41,08	26a	35,68	31,83	3,85	7,70	27	37,97	32,64	5,33	10,66
	apačia	28a	45,24	31,83	13,41	26,82	29	33,70	29,87	3,83	7,66	29a	36,57	32,25	4,32	8,64
2 st., 4 lauk.	viršus	31	34,95	33,34	1,61	3,22	31a	34,28	33,59	0,69	1,38	32	34,09	33,24	0,85	1,70
	vidurys	33a	40,03	33,59	6,44	12,88	34	32,70	31,59	1,11	2,22	34a	32,93	31,30	1,63	3,26
	apačia	36	34,75	32,31	2,44	4,88	36a	34,02	33,35	0,67	1,34	37	32,82	31,63	1,19	2,38
2 st., 5 lauk.	viršus	38a	33,98	30,28	3,70	7,40	39	29,02	25,70	3,32	6,64	39a	39,44	31,59	7,85	15,70
	vidurys	41	35,51	31,89	3,62	7,24	41a	33,49	30,79	2,70	5,40	42	33,86	26,59	7,27	14,54
	apačia	43a	39,25	31,70	7,55	15,10	44	38,04	33,13	4,91	9,82	44a	41,14	32,89	8,25	16,50

Stacionaras, agropriemonė	Šlaito dalis	1–0,5 mm					0,5–0,25 mm					Suma		Struktūringumo koeficientas
		Biukso nr.	Svoris su žemėm	Tuščio biukso svoris	Natūralaus dirvožemio svoris		Biukso nr.	Svoris su žemėm	Tuščio biukso svoris	Natūralaus dirvožemio svoris		>1,0mm	>0,25 mm	
1 st., 4 lauk.	viršus	17a	41,73	33,61	8,12	16,24	18	40,36	31,74	8,62	17,24	9,34	42,82	2,53
	vidurys	20	35,22	31,59	3,63	7,26	20a	38,15	32,82	5,33	10,66	3,08	21,00	1,32
	apačia	22a	35,52	32,39	3,13	6,26	23	37,06	32,04	5,02	10,04	3,28	19,58	1,25
1 st., 5 lauk.	viršus	25	36,72	30,82	5,90	11,80	25a	33,53	30,42	3,11	6,22	54,18	72,20	1,58
	vidurys	27a	34,03	30,69	3,34	6,68	28	34,12	32,63	1,49	2,98	59,44	69,10	0,78
	apačia	30	38,05	32,16	5,89	11,78	30a	36,41	32,35	4,06	8,12	43,12	63,02	1,50
2 st., 4 lauk.	viršus	32a	33,95	32,37	1,58	3,16	33	42,01	30,42	11,59	23,18	6,30	32,64	2,72
	vidurys	35	35,76	32,65	3,11	6,22	35a	45,07	32,87	12,20	24,40	18,36	48,98	3,34
	apačia	37a	35,61	31,92	3,69	7,38	38	41,59	32,27	9,32	18,64	8,60	34,62	2,12
2 st., 5 lauk.	viršus	40	36,50	28,40	10,10	20,10	40a	41,70	32,90	8,80	17,60	29,74	67,54	1,89
	vidurys	42a	43,07	32,54	10,53	21,06	43	31,17	22,20	8,97	17,94	27,18	66,18	1,95
	apačia	45	41,60	34,29	7,31	14,62	45a	37,48	32,63	4,85	9,70	41,42	65,74	1,16

3 priedas

1 lentelė. Fosfatų (PO₄) netekimas su vandens nuotėkiu (mg l⁻¹), 2014, 2015, 2017 m.

Metai/ stacionarai ir agropriemonė		2014		2015		2017	Vidurkis
		Rugpjūtis	Spalis	Liepa	Rugsėjis	Rugsėjis	
1 st. (7–9°)	Lauko augalų sėjomaina	0,42	0,35	0,27	0,17	0,04	0,25 ±0,06
	Daugiametės žolės	0,08	0,03	0,09	0,06	0,02	0,06 ±0,01
2 st. (9–11°)	Lauko augalų sėjomaina	0,84	0,98	0,41	0,26	0,11	0,52 ±0,15
	Daugiametės žolės	0,42	0,48	0,32	0,16	0,03	0,28 ±0,07
Vidurkis		0,44 ±0,13	0,46 ±0,17	0,27 ±0,06	0,16 ±0,03	0,05 ±0,02	

2 lentelė. Nutekėjusio vandens kiekis (l), 2014, 2015, 2017 m.

Metai/ stacionarai ir agropriemonė		2014		2015		2017	Vidurkis
		Rugpjūtis	Spalis	Liepa	Rugsėjis	Rugsėjis	
1 st. (7–9°)	Lauko augalų sėjomaina	180,00	20,00	65,50	38,00	36,00	67,90
	Daugiametės žolės	15,40	9,00	49,50	21,00	28,00	4,90
2 st. (9–11°)	Lauko augalų sėjomaina	200,00	40,00	97,00	36,00	164,50	107,50
	Daugiametės žolės	15,50	23,50	32,00	21,00	8,50	20,10
Vidurkis		102,70	23,10	61,00	29,00	59,30	

3 lentelė. Judriojo fosforo (P₂O₅) nuostoliai (kg ha⁻¹) su nutekėjusiu dirvožemiu, 2014, 2015, 2017 m.

Metai/ stacionarai ir agropriemonė		2014	2015	2017	Vidurkis
1 st. (7–9°)	Lauko augalų sėjomaina	1,08	0,98	0,65	0,9 ±0,11
	Daugiametės žolės	0,49	0,25	0,50	0,41 ±0,07
2 st. (9–11°)	Lauko augalų sėjomaina	1,46	0,41	5,39	2,42 ±1,24
	Daugiametės žolės	0,19	0,19	2,34	0,91 ±0,59
Vidurkis		0,81 ±0,25	0,46 ±0,16	2,22 ±0,98	