

VILNIAUS UNIVERSITETAS
GAMTOS TYRIMŲ CENTRO
GEOLOGIJOS IR GEOGRAFIJOS INSTITUTAS

Žana Skuratovič

AERACIJOS ZONOS MODELIAI IR JŲ TAIKYMAI RADIOAKTYVIŲJŲ
ATLIEKŲ KAPINYNO SAUGOS ANALIZEI

Daktaro disertacija
Fiziniai mokslai, geologija (05 P)

Vilnius, 2013

Disertacija rengta 2009–2012 metais Gamtos tyrimų centro Geologijos ir
Geografijos institute

Mokslinis vadovas:

Prof. habil. dr. Jonas Mažeika (Gamtos tyrimų centro Geologijos geografijos
institutas, fiziniai mokslai, geologija – 05 P)

IVADAS	4
1. LITERATŪROS APŽVALGA	13
1.1. Radioaktyviosios atliekos ir jų tvarkymo principai.....	13
1.2. Radionuklidų pernašos procesai kapinyno sistemoje.....	16
1.3. Paviršinio kapinyno koncepcija Lietuvoje	19
1.4. Saugos analizės principai	21
1.5. Drėgmės pernašos aeracijos zonoje ypatumai.....	23
1.6. Izotopiniai tyrimai aeracijos zonoje ir kitose vandens sistemose	29
1.7. Aeracijos zonos matematiniai modeliai	32
1.8. Aeracijos zonos modelių panaudojimas saugos analizėje.....	38
2. METODINĖ DALIS.....	42
2.1. Tyrimų objektai	42
2.2. Tyrimų metodai	44
2.2.1 Fizikinių-mechaninių grunto savybių ir filtracijos koeficiento nustatymas	46
2.2.2. Grunto drėgmės išgavimas izotopiniams tyrimams	50
2.2.3. Tričio savitojo aktyvumo krituliuose, aeracijos zonos drėgmėje ir gruntiniame vandenyje nustatymas	51
2.2.4. Stabilių izotopų santykio ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ir $^2\text{H}/^1\text{H}$) ir tričio (^3H) pasiskirstymo krituliuose, aeracijos zonos drėgmėje ir gruntiniame vandenyje nustatymas	53
2.2.5. Aeracijos zonos modeliavimo principai, naudojant HYDRUS-1D.....	55
3. REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS.....	63
3.1. Eksperimentiniai tyrimai	63
3.1.1. Aeracijos zonos gruntų fizikinės-mechaninės savybės	63
3.1.2. Stabilių izotopų ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ir $^2\text{H}/^1\text{H}$) ir tričio (^3H) pasiskirstymo krituliuose, aeracijos zonos drėgmėje ir gruntiniame vandenyje ypatumai	72
3.2. Drėgmės ir priemaišų pernašos aeracijos zonoje modeliai	84
3.2.1. Modelių geometrija, parametrai ir ribinės sąlygos	88
3.2.2. Modeliavimo pagal hipotetinius scenarijus rezultatai	94
3.2.3. Hipotetinių priemaišų koncentracijos pasiskirstymas aeracijos zonos profiluose	97
3.3. Tričio pernašos aeracijos zonoje modelis.....	105
IŠVADOS	118
REKOMENDACIJOS	120
LITERATŪRA	121
PRIEDAI.....	132

Įvadas

Mokslo ir technologijų pažangos dėka per pastaruosius kelis šimtmečius sukuriama vis daugiau cheminių ir radioaktyviųjų medžiagų, kurios neretai patenka į aplinką. Vienos medžiagos (trašos, pesticidai, farmacijos produktų ir hormonų liekanos kartu su patogeniniais mikroorganizmais) pastoviai įterpiamos į aplinką per intensyvią žemės ūkio praktiką, kitos medžiagos (organiniai junginiai, druskos, toksiniai mikroelementai) netyčia pasklinda iš pramoninių ir buitinių atliekų sąvartynų industrinėse ir itin urbanizuotose teritorijose, dar kitos medžiagos (dažniausiai radioaktyviosios) susidaro branduolinėse technologijose skirtose taikiems tikslams ar ginklų gamybai. Nors ir būdamos labai skirtingos kilmės, daugelis iš šių medžiagų gali patekti į ekosistemų cheminių elementų biogeocheminius ciklus ir kelti pavojų sveikatai, ypač, kai jos įsijungia į maisto grandinę per paviršinį ir požeminį vandenį.

Valstybėse su branduoline energetika radioaktyviųjų atliekų tvarkymo saugos klausimai tampa ypač aktualūs. Sprendžiant šiuos klausimus, didelis dėmesys skiriamas paviršiniams atliekynams (saugykloms ir kapinynams) su gamtiniais ir inžineriniais barjeriais. Pastaraisiais dešimtmečiais aeracijos zonos gruntai nagrinėjami kaip pirmasis gamtinis barjeras, gebantis žymiu mastu riboti teršiančių medžiagų sklaidą. Radioaktyviųjų atliekų saugyklose ir kapinyuose esantys radionuklidai ilgainiui per aeracijos zoną gali pasiekti ir užteršti gruntinio vandens sluoksnį bei sukelti pavojų aplinkai ir žmogui.

Lietuvoje mažo ir vidutinio aktyvumo radioaktyviosios atliekos, susidariusios anksčiau medicinoje, pramonėje ir moksliniuose tyrimuose, šiuo metu laikomos Maišiagalos radioaktyviųjų atliekų saugykloje. Trumpaamžėms mažo ir vidutinio aktyvumo radioaktyviosioms atliekoms, sukauptoms eksploatuojant Ignalinos atominę elektrinę (IAE) ir susidarysiančioms ją išmontuojant, talpinti artimiausiu metu bus įrengtas kapinynas netoli IAE. Išnagrinėjus Lietuvos teritorijos geologines sąlygas, IAE regionas įvertintas kaip labiausiai tinkamas kapinyno įrengimui. Radioaktyviųjų atliekų laidojimas

yra paskutinis žingsnis radioaktyviųjų atliekų tvarkymo grandinėje. Tam, kad būtų įvertintas galimas radioaktyviosios taršos poveikis yra atliekami tyrimai ir sudaromos įvairių scenarijų radioekologinių padarinių prognozės, modeliuojant radionuklidų migraciją iš radioaktyviųjų atliekų kapinynų bei ją įtakojančius procesus. Prognozuojant atliekose esančių radionuklidų poveikio aplinkai mastą, nagrinėjami radionuklidų pernašos inžineriniuose ir gamtiniuose barjeruose uždaviniai. Drėgmės pernašos procesai aeracijos zonoje netolimoje praeityje dažnai buvo labai supaprastinami arba apskritai jų buvo nepaisoma, nors aeracijos zonos procesai būdingi ir papildomai įrengiamiems inžinerinių barjerų sluoksniams.

Nagrinėjant vandens judėjimo grunte procesus, įvairių diferencialinių lygčių sprendimui skaitiniai metodai buvo pradėti plačiausiai naudoti tuomet, kai buvo sukurti pakankamai didelių greičių kompiuteriai. Šiuo metu gausu matematinio modeliavimo priemonių, leidžiančių prognozuoti vandens ir jame esančių priemaišų pernašą sluoksnyje tarp žemės ir gruntinio vandens paviršių. Tačiau dažnai išlieka modelių kalibravimo pagal eksperimentinius duomenis klausimas, ypač tuomet, kai nagrinėjami prognoziniai scenarijai dar tik planuojamiems statyti objektams.

Drėgmės pernaša aeracijos zonoje yra svarbi vandens apykaitos ciklo dalis ir neatsiejama nuo daugelio hidrologinių ir hidrogeologinių veiksnių ir procesų. Procesų analizė ir prognozė reikalauja tinkamų priemonių. Kai kurių problemų sprendimui pakanka palyginus paprastų analitinių ar pusiau analitinių modelių, kitos problemos reikalauja sudėtingų skaitinių modelių.

Šiame darbe detaliau išnagrinėta ir panaudota kompiuterinė programa HYDRUS, kuri leidžia analizuoti gruntų bei pasirinktų inžinerinių medžiagų savybes, jų kaitą, veikiant krituliams, drėgmės išgaravimui, augalų dangai bei daugeliui kitų aplinkos veiksnių ir procesų. Taip pat galima įvertinti drėgmės bei priemaišų migraciją, esant skirtingo išotinio ar pilnai vandeniui prisotintiems gruntams.

Darbo tikslas

Atlikus eksperimentinius tyrimus charakterizuoti, dviejų branduolinių objektų aikštelių esančių skirtingose hidrogeologinėse sąlygose, aeracijos zonos gruntus, pateikti aeracijos zonos gruntuose vystančių drėgmės (ir priemaišų) pernašos procesų charakteristikas ir įvertinti jų ypatumus.

Tyrimų objektas

Branduolinių objektų aikštelių aeracijos zona ir joje vykstantys procesai, lemiantys pirmo gamtinio barjero iki gruntinio vandens paviršiaus įdrėkimą ir priemaišų pernašą neįsotintoje vandeniui aplinkoje.

Tyrimų metodai

Šiame darbe kompleksiniais eksperimentiniais, stebėjimo bei modeliavimo metodais nagrinėjami aeracijos zonos tyrimų aikštelėse drėgmės bei priemaišų pernašos procesai.

Darbo uždaviniai

1. Parinkti ir optimizuoti aeracijos zonos eksperimentinių tyrimų, stebėjimų ir modeliavimo metodiką.
2. Surinkti aeracijos zonos grunto nesuardytos ir suardytos sandaros ėminius.
3. Atlikti aeracijos zonos grunto fizikinių-mechaninių savybių ir hidraulinio laidumo tyrimus.
4. Atlikti sistemingus gruntinio vandens lygio stebėjimus ir mėnesio kritulių, gruntinio vandens bei aeracijos zonos drėgmės izotopinius (tričio, deguonies-18 ir deuterio) tyrimus.
5. Sudaryti aeracijos zonos modelius, pagrindžiant juos *in situ* tyrimų ir laboratorinių eksperimentų rezultatais, ir palyginti saugos požiūriu reikšmingus drėgmės ir priemaišų pernašos aeracijos zonoje ypatumus dviejų branduolinių objektų aikštelėse.

Darbo mokslinis naujumas

Ligi šiol trūko išsamesnių aeracijos zonos eksperimentinių tyrimų ir analizės, panaudojant skaitinius metodus.

1. Pirmą kartą Lietuvoje krituliuose ir aeracijos zonos grunto profilių drėgmėje nustatyti globaliai paplitusio radionuklido tričio (^3H) bei vandens molekulės izotopinių traserių ($\delta^{18}\text{O}$ ir $\delta^2\text{H}$) pasiskirstymo ypatumai.

2. Remiantis izotopinių tyrimų duomenimis, sudaryti aeracijos zonos skaitiniai modeliai, kurie svarbūs branduolinės objektų saugos vertinimui.

Ginamieji teiginiai

Drėgmės pernašos procesai aeracijos zonoje suvidurkina globalių procesų nulemta kritulių stabilųjų izotopų ir tričio sezoninės variacijas, sezoninių smailių pėdsakai yra kontrastiškesni tik greitos infiltracijos atveju.

Drėgmės (ir priemaišų) pernašą aeracijos zonoje veikia ir komplikuoja grunto fizikinių-mechaninių ir migracinių savybių variacijos; net ir labai mažo storio nelaidaus grunto sluoksnis sudaro drėgmės (ir priemaišų) sklaidą ribojantį gamtinį barjerą.

Kompleksinių izotopinių tyrimų duomenų panaudojimas aeracijos zonos skaitinių modelių kalibravimui leidžia pagerinti jų kokybę ir sumažinti prognozių rezultatų neapibrėžtį.

Disertaciją sudaro įvadas, 3 pagrindiniai skyriai, darbo išvados, literatūros šaltinių sąrašas, priedai. Iš viso: 138 puslapiai teksto, 48 paveikslai ir 17 lentelių.

Publikacijų sąrašas

- Jakimavičiūtė-Maseliene V., Mažeika J., Skuratovič Ž. 2008. Water flow in the different types of unsaturated soils in Lithuania. The Second HYDRUS workshop proceedings, March 28, Prague, Czech Republic. Prague. ISBN 9788021317833. p. 79–83.
- Skuratovič Ž., Jakimavičiūtė-Maseliene V., Mažeika J. 2008. Drėgmės ir tričio pernaša paviršiniame radioaktyviųjų atliekų kapinyne. 11-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“, metų teminės konferencijos *APLINKOS APSAUGOS INŽINERIJA*, įvykusios Vilniuje 2008 m. balandžio 3 d., straipsnių rinkinys, ISBN 978-9955-28-385-0. p. 358–366.
- Mažeika J., Guobytė R., Kibirskštis G., Petrošius R., Skuratovič Ž., Taminskas J. 2009. The use of carbon-14 and tritium for peat and water dynamics characterization: case of Čepkeliai peatland, southeastern Lithuania. *Geochronometria*, 34, DOI 10.2478/v10003-009-0007-3. p. 41–48.
- Mažeika J., Petrošius R., Skuratovič Ž. 2009. Key radionuclides in the aquatic environment of Ignalina NPP. *Visuomenės sveikata* 3(46), priedas Nr. 1 ISSN: 1392–6373 3. p. 78–84.
- Mažeika J., Skuratovič Ž., Garbaras A., Martma T. 2010. Stabiliųjų izotopų variacijos Kuršių marių šiuolaikinėse nuosėdose. *Jūros ir krantų tyrimai, Konferencijos medžiaga*, Palanga. p. 122–123.
- Мажейка Й., Скуратович Ж. 2009. Радионуклиды в водных средах района Игналинской АЭС. Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека, *материалы III международной конференции, г. Томск*. STT, ISBN 5-93629-358-0. p. 328–332.
- Maseliene-Jakimavičiūtė V.; Mažeika J., Petrošius R.; Skuratovič Ž. Hydrogeology model of Ignalina region for Visaginas well field protection zone substantiation 8th International Conference "Environmental Engineering", May 19-20, 2011, Vilnius, Lithuania : selected papers. Vol. 1.

- Environmental protection. Vilnius : Technika, 2011. ISSN 2029-7106. ISBN 9789955288268. p. 127–133.
- Skuratovič Ž. 2012. Eksperimentiniai tyrimai ir stebėjimai Maišiagalos radioaktyviųjų atliekų saugyklos teritorijoje. *Geologijos akiračiai*. ISSN 1392-0006. Vilnius, 2011, Nr. 3–4. p. 20–25.
- Motiejūnas S., Vaidotas A., Mažeika J., Skuratovič Ž., Vaitkevičienė V. 2012. Radiocarbon measurements in cemented ion-exchange resins. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 1475. Materials Research Society DOI: 10.1557/opl.627*. p. 527–532.
- Мажейка Й., Пятрошнос Р., Скуратович Ж. 2012. Тритий в окружающей среде во время эксплуатации Игналинской АЭС. Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде. *Материалы VII Международной научно-практической конференции*. Семипалатинский государственный педагогический институт. Т. II. Семей. p. 196–204.
- Mažeika J., Vaitkevičienė V., Skuratovič Ž., Petrošius R., Motiejūnas S., Vaidotas A., Oryšaka A., Ovčnikov S. 2012. Anglis-14 panaudotose jonitinėse dervose Ignalinos atominėje elektrinėje. *Visuomenės sveikata*. Priedas Nr. 2. p. 71–74.
- Skuratovič Ž. 2012. Tarptautinė mokslinė konferencija, skirta radioaktyviosios anglies (C-14) tyrimams. *Geologijos akiračiai*. ISSN 1392-0006. Vilnius. Nr. 4. 58 p.
- Piličiauskas G., Mažeika J., Gaidamavičius A., Vaikutienė G., Bitinas A., Skuratovič Ž., Stančikaitė M. 2012. New Archeological, Paleoenviromental and ^{14}C data from the Šventoji Neolithic sites, NW Lithuania. *Proceedings of the 6th International Radiocarbon and Archaeology Symposium*, edited by E Boaretto and N Rebollo *RADIOCARBON*, Vol 54, Nr 1. p. 1–15.
- Baužienė J., Mažeika J., Skuratovič Ž. 2013. Fallout ^{137}Cs and natural ^{40}K as tracers of topsoil development during slope processes – a case study from the

Daugavai environs, southern Lithuania. *Geochronometria*, ISSN 1897-1695 (online), 1733–8387 (print) 40(2). p. 126–133.

Jonas Mažeika, Tõnu Martma, Rimantas Petrošius, Vaidotė Jakimavičiūtė-Maselienė, Žana Skuratovič. 2013. Radiocarbon and Other Environmental Isotopes in the Groundwater of the Sites for Planned New Nuclear Power Plant in Lithuania. *Proceedings of the 21st International Radiocarbon Conference* edited by A J T Jull & C Hatté *RADIOCARBON*, Vol 55, Nr 2–3, 2013, p. 951–962.

Violeta Vaitkevičienė, Jonas Mažeika, Žana Skuratovič, Stasys Motiejūnas, Algirdas Vaidotas, Aleksandr Oryšaka, Sergej Ovčnikov. 2013. ¹⁴C in Radioactive Waste for Decommissioning of the Ignalina Nuclear Power Plant. *Proceedings of the 21st International Radiocarbon Conference* edited by A J T Jull & C Hatté *RADIOCARBON*, Vol 55, Nr 2–3, 2013, p. 783–790.

Darbai, pristatyti konferencijose

Skuratovič Ž., Mažeika J., Jakimavičiūtė-Maselienė V. Drėgmės ir tričio pernaša paviršiniame radioaktyviųjų atliekų kapinyne. 11-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas–Lietuvos ateitis“, 2008 m. balandžio 3 d., Vilnius, Lietuva.

Skuratovič Ž., Plaipaitė R., Jakimaviciūtė-Maselienė V., Mažeika J., Petrošius R. Tritis ir anglis-14 AE aplinkoje: kaita ir dabartinė būklė. Kasmetinė doktorantų ir jaunųjų mokslininkų konferencija „Jaunoji Energetika“, 2008 m. gegužės 29 d., Kaunas, Lietuva.

Mažeika J., Skuratovič Ž. Tritis ir radioanglis Ignalinos AE aplinkoje. Jaunųjų mokslininkų konferencija „Bioateitis: gyvybės ir geomokslų perspektyvos“, 2009 m. gruodžio 15 d., Lietuvos mokslų akademija, Vilnius, Lietuva.

Mažeika J., Skuratovič Ž., Garbaras A., Martma T. Stabiliųjų izotopų variacijos Kuršių marių šiuolaikinėse nuosėdose. Jūros ir krantų tyrimai – 2010, balandžio 13–16, Palanga, Lietuva.

- Piličiauskas G., Mažeika J., Gaidamavičius A., Vaikutienė G., Bitinas A., Stančikaitė M., Skuratovič Ž. A new data from Šventoji Neolithic sites, W Lithuania: integrating archaeological data, chronological framework and environmental history. Radiocarbon and Archaeology 6th International Symposium Pafos, Cyprus. April 10–15, 2011.
- Jakimavičiūtė-Maselienė V., Mažeika J., Petrošius R., Skuratovič Ž. Visagino (Ignalinos rajono). Laukų apsaugos zonos pagrindimo hidrogeologinis modelis. 8-oji tarptautinė konferencija „Aplinkos inžinerija“ 2011 m. gegužės 19–20 d., Vilnius, Lietuva.
- Skuratovič Ž., Mažeika J., Martma T., Petrošius R., Jakimavičiūtė-Maselienė V. „Radiocarbon and other environmental isotopes in groundwater of sites for planned new nuclear power plant in Lithuania”. 21st International Radiocarbon Conference. July 9-13, 2012 UNESCO, Paris, France.
- Vaitkevičienė V., Mažeika J., Skuratovič Ž. The Improved Technology for the Quantitative Evaluation of Organic and Inorganic Fraction of ¹⁴C from Cementitious Radioactive Ion Exchange Resins. Scientific Conference on Chemistry and Chemical Technology „Polymer chemistry and technology. Kauno technologijos universitetas „Chemija ir cheminė technologija“ 2012 m. Kaunas, 2012.
- Mažeika J., Vaitkevičienė V., Skuratovič Ž., Motiejunas S., Vaidotas A., Oryshaka A., Ovchinnikov S. Carbon-14 in radioactive waste for decommissioning of nuclear reactors. 21st International Radiocarbon Conference. July 9–13, 2012 UNESCO, Paris, France.
- Мажейка Й., Пятрошюс Р., Скуратович Ж. Радионуклиды в водных средах района Игналинской АЭС. VII Международная научно-практическая конференция Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде. Семипалатинский государственный педагогический институт, 4–8 октября 2012 г.

Padėka

Disertacija rengta 2009–2012 metais Gamtos tyrimų centre, Radioizotopinių tyrimų laboratorijoje. Nuoširdžiai dėkoju moksliniam vadovui prof. habil. dr. Jonui Mažeikai rūpestingą vadovavimą studijų metu. Esu dėkinga dr. Petruui Klizui už suteiktą galimybę atlikti darbus laboratorijoje. Taip pat noriu padėkoti dr. Tonu Martma (Talino technikos universitetas) už stabilų izotopų matavimus. Dėkoju dr. Sauliui Gadeikiui ir Julijai Vaitkevičienei už grunto granulimetrinės sudėties nustatymą, Elvyrai Bulavkaitei, Juozui Kapeckui už bendradarbiavimą ir pagalbą. Labai dėkoju dr. Rimantui Petrošiui, dr. Vaidotei Jakimavičiutei-Maselienei, dr. Algirdui Zuzevičiui už vertingas pastabas ir patarimus bei skyrių redakciją. Esu dėkinga už galimybę atlikti eksperimentinius tyrimus bei suteiktą informaciją Radioaktyviųjų atliekų tvarkymo agentūrai. Už finansinę paramą esu dėkinga Lietuvos valstybiniam mokslo ir studijų fondui, Lietuvos mokslo tarybai.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Radioaktyviosios atliekos ir jų tvarkymo principai

Radioaktyviosios atliekos, kaip jonizuojančiosios spinduliuotės šaltinis, yra potenciali grėsmė žmogaus sveikatai ir aplinkai, todėl reikalauja ypatingo dėmesio. Radioaktyvios atliekos susidaro atominės energijos gamybos metu, veikiant branduoliniams reaktoriams, branduolinio kuro gamybos ciklo metu, mokslinių tyrimų, sveikatos priežiūros institucijų bei pramonės įmonių veikloje (Performance., 2006). Atliekos turi būti tvarkomos taip, kad nekeltų grėsmės žmonėms ir aplinkai. Radioaktyviųjų atliekų kapinynai pagal gylį grupuojami į paviršinius (įrengiami ant žemės paviršiaus ar kelių dešimčių metrų gylyje), giluminius (įrengiami kelių šimtų metrų gylyje, jie skirti panaudotam kurui ir labai aktyvioms atliekoms laidoti) (Performance..., 2005). Kietosios radioaktyvios atliekos klasifikuojamos pagal 1 lentelę.

1 lentelė. Kietųjų radioaktyviųjų atliekų klasifikavimas (Branduolinės..., 2010).

Atliekų klasės	Apibrėžimas	Santrumpa	Paviršinė dozės galia, mSv/h	Galutinis apdorojimas	Laidojimo būdas
0	Nebekontroliuojamos atliekos	NA		Nereikalingas	
Trumpaamžės mažo ir vidutinio aktyvumo atliekos					
A	Labai mažo aktyvumo atliekos	LMAA	<0,5	Nereikalingas	Labai mažo aktyvumo atliekų kapinyne
B	Mažo aktyvumo atliekos	MAA–TA	0,5–2	Reikalingas	Paviršiniame kapinyne
C	Vidutinio aktyvumo atliekos	VAA–TA	>2	Reikalingas	Paviršiniame kapinyne
Ilgaamžės mažo ir vidutinio aktyvumo atliekos					
D	Mažo aktyvumo atliekos	MAA–IA	<10	Reikalingas	Paviršiniame kapinyne (ertmės vidutiniame gylyje)

Atliekų klasės	Apibrėžimas	Santrumpa	Paviršinė dozės galia, mSv/h	Galutinis apdorojimas	Laidojimo būdas
E	Vidutinio aktyvumo atliekos	VAA-IA	>10	Reikalingas	Giluminiam kapinyne
Panaudoti uždarieji šaltiniai					
F	Panaudoti uždarieji šaltiniai	PUŠ		Reikalingas	Paviršiniame arba giluminiam kapinyne

Lietuvoje trumpaamžės labai mažo, mažo ir vidutinio radioaktyvumo atliekos bus laidojamos paviršiniuose kapinynuose, specialiai įrengtoje vietoje radioaktyvioms atliekoms, kurioje atliekos kaupiamos, neketinant jų išimti.

IAE eksploatavimo nutraukimo metu susidarys maždaug 60 tūkst. m³ labai žemo aktyvumo radioaktyvių, 100 tūkst. m³ žemo ir vidutinio aktyvumo radioaktyvių, 2,5 tūkst. t panaudoto branduolinio kuro ir 10 tūkst. m³ kitų ilgaamžių radioaktyviųjų atliekų (<http://www.rata.lt/lt.php/radioaktyviu-atlieku-tvarkymas>). IAE yra ypatingos svarbos Lietuvos ūkio objektas, todėl reikalavo labai daug dėmesio ir kontrolės praeityje, tiek ir reikalauja po jos uždarymo. Visos nuo IAE eksploatavimo pradžios susidariusios radioaktyviosios atliekos šiuo metu saugomos elektrinėje įrengtose saugyklose, bet tai tik laikinas sprendimas. Jau IAE uždarymo laikotarpiu Radioaktyviųjų atliekų tvarkymo agentūra (RATA) pradėjo vystyti planus dėl saugaus ir atitinkančio tarptautinę praktiką radioaktyviųjų atliekų laidojimo. Radioaktyviųjų atliekų laidojimas yra paskutinis žingsnis radioaktyviųjų atliekų tvarkymo grandinėje. Uždarant IAE susidarysiančias mažo ir vidutinio aktyvumo trumpaamžes radioaktyvias atliekas numatoma patalpinti paviršiniame kapinyne, kuris bus įrengtas šalia IAE. 2007 m. vasarį Stabatiškės aikštelė buvo parinkta paviršinio kapinyno įrengimui (Paviršinio..., 2007).

Atlikus inžinerinius geologinius tyrimus, dėl palankių veiksnių – nedidelis atstumas iki IAE, palankios socialinės ir ekonominės sąlygos, tinkamos žemės paviršiaus ir geologinės sandaros ypatybės – žemo ir vidutinio aktyvumo radioaktyviųjų atliekų kapinyno įrengimui buvo parinkta Stabatiškės

aikštelė (Paviršinio..., 2007). Greta žemo ir vidutinio aktyvumo radioaktyvių atliekų saugaus sutvarkymo viena svarbiausių IAE eksploatacijos nutraukimo saugos sričių yra panaudoto branduolinio kuro (PBK) saugojimas. Nuo IAE eksploataavimo pradžios panaudotas branduolinis kuras saugomas vandenyje, specialiuose baseinuose, tose pačiose patalpose, kur ir reaktoriai. Tai yra laikinas saugojimo būdas, todėl buvo įsigyti specialūs saugojimo konteineriai ir įrengta sauso tipo oru aušinama saugykla, kurios sauga užtikrinta 50 metų laikotarpiui. Dalis panaudoto branduolinio kuro jau yra patalpinta į specialius konteinerius ir išvežta į PBK saugojimo aikštelę.

Paviršiniai radioaktyviųjų atliekų kapinynai daugelyje šalių naudojami kietoms ir sukietintoms trumpaamžėms labai žemo, žemo ir vidutinio aktyvumo radioaktyviosioms atliekoms laidoti, tačiau kapinynai skiriasi savo tipu, radioaktyvių atliekų kiekiu, įrenginių konstrukcijomis. Tokių atliekų laidojimo praktika siekia jau kelis dešimtmečius. Kapinynai yra statomi šalia esamų branduolinių objektų, pvz. La Manshe, (Prancūzija), Olkiluoto (Suomija), Forsmark (Švedija), Rokkasho (Japonija), Mochovce (Slovakija), toli nuo branduolinių objektų, pvz. Vaalputs (Pietų Afrika), Gobi (Kinija), L'Aube (Prancūzija). Tyrimai parodė, kad šis atliekų laidojimo metodas užtikrina realią ir saugią atliekų izoliacijos galimybę ir patikima žmogaus bei aplinkos apsaugą. Pasaulyje nėra vieningos atliekų klasifikavimo sistemos, įvairiose šalyse ji nežymiai skiriasi. Atliekų klasifikavimas leidžia pasirinkti laidojimo būdą.

Trumpaamžės žemo ir vidutinio aktyvumo radioaktyvios atliekos išlieka pavojingos maždaug 300 metų, todėl kapinynai turi išlikti patvarūs visą šį laikotarpį. Gerai sukonstruoti paviršiniai kapinynai yra efektyvus ir ekonomišką būdas, leidžiantis saugiai izoliuoti tam tikras radioaktyviųjų atliekų rūšis. Kapinynų sauga ir žmonių pasitikėjimas juose naudojamomis technologijomis gali būti padidintas, taikant saugos reikalavimus ir priemones kapinyno eksploatacijos laikotarpyje ir po kapinyno uždarymo (aktyvus monitoringas, stebėjimo ir priežiūros darbai, pasyvus monitoringas, t.y. žemės naudojimo kontrolė ir stebėjimų registravimas) (Safety..., 1999).

Terminas „paviršiniai kapinynai“ yra gana platus ir apima įvairius atliekų tvarkymo būdus. Tai gali būti radioaktyviųjų atliekų laidojimas grunte, kelių metrų gylio tranšėjose, betoniniuose kapinyuose, laidojimas betoniniuose „šachtos“ tipo kapinyuose ir laidojimas uolienų tuštumose kelių dešimčių metrų gylyje. Terminas „laidojimas“ reiškia atliekų talpinimą į inžinerinėmis priemonėmis sutvirtintus įrenginius, nenumatant tolesnio atliekų perlaidojimo (Приповерхностное..., 2003).

Išskiriami trys pagrindiniai etapai, susiję su radioaktyviųjų atliekų paviršinio kapinyno eksploatacija, t.y. etapas prieš kapinyno eksploataciją, eksploatacijos etapas ir etapas po kapinyno uždarymo. Etapui prieš eksploataciją būdingi tyrimai, reikalingi aikštelės parinkimui ir projektavimui. Eksploatacijos etapą sudaro tiesioginė kapinyno eksploatacija (tęstinis atliekų talpinimas) ir jo uždarymas. Etapui po uždarymo būdingi įvairūs veiksmai, susiję su kapinyno kontrole, kuri gali būti aktyvi arba pasyvi.

Atsižvelgiant į galimus prognozuojamus kapinyno evoliucijos būdus po jo uždarymo, jis projektuojamas taip, kad dozė neviršytų didžiausios leidžiamos dozės ir nebūtų nepriimtinos rizikos žmonėms bei aplinkai. Ilgalaikė kapinynų sauga užtikrinama aikštelės su palankiomis sąlygomis parinkimu ir inžineriniais sprendimais. Paviršinių kapinynų sistema reikalauja, visų pirma, patikimos radioaktyviųjų atliekų izoliacijos nuo aplinkos, ir antra – per ilgą laiką patenkančių į aplinką radionuklidų kontrolės.

1.2. Radionuklidų pernašos procesai kapinyno sistemoje

Teršiančių medžiagų pernaša (sklaida) aplinkoje priklauso nuo daugelio veiksnių, kuriuos lemia gamtinės dispersinės aplinkos ir teršiančių medžiagų savybės. Tirpios teršiančios medžiagos gali būti tiek ištirpusioje, taip ir adsorbuotoje būsenoje. Ištirpusios būsenos teršiančių medžiagų koncentracijos pasikeitimas vyksta dėl jų desorbcijos nuo gamtinės dispersinės sistemos kietos fazės, aerolinių nusėdimų sugėrimo nuo dispersinių paviršių ir teršiančių medžiagų tiesioginės pernašos su drėgmės srautu. Todėl teršalų perskirstymui

įtakos turi visi hidrologiniai – hidrogeologiniai procesai (krituliai, garavimas, drėgmės srautas ir kt.) (Кундас и др., 2011).

Galima išskirti du pagrindinius tipus fizikinių mechanizmų, nusakančių teršiančios medžiagos persiskirstymą gamtinėje dispersinėje aplinkoje (Пачепский, 1990):

- teršiančios medžiagos pernešimas su drėgme (hidrologiniai ir hidrogeologiniai aspektai);
- sorbcija, desorbcija ir radionuklidų skilimas (fizikiniai-cheminiai).

Teršiančių medžiagų koncentracijos pasikeitimui įtakos turi taip pat ir biologiniai procesai, pvz., jų įsisavinimas augalais.

Drėgmės srautas pradeda formuotis, kai žemės paviršių pasiekia lietaus lašai. Pradiniame etape lietaus vanduo ardo kietąsias medžiagas, jas tirpinant, vyksta vandens pasipildymas priemaišomis, kurios yra dispersinės sistemos paviršiuje.

Drėgmės pernašą lemia šie procesai:

- drėgmės įsisunkimas (infiltracija);
- drėgmės išgaravimas;
- drėgmės netekimas dėl augalų šaknų pasisavinimo;
- drėgmės judėjimas skystoje ir dujinėje fazėse dėl drėgmės ir temperatūros gradiento.

Infiltracijos greitis priklauso nuo aplinkos charakteristikos ir joje esančios drėgmės kiekio. Pradžioje įsigėrimo greitis būna didelis, todėl kad formuojasi fiziškai surištas vanduo. Kai sistema tampa išotinta, įsigėrimo greitis sumažėja. Tiriant medžiagų pernešimą, būtina atkreipti dėmesį į hidrogeologinius procesus, todėl kad ištirpusių medžiagų pernešimą gamtinėje dispersinėje aplinkoje lemia advekcija ir dispersija su drėgmės srautu. Teršiančių medžiagų pasiskirstymą tarp kietos ir skystos fazių galima įvertinti eksperimentiškai ir naudojant analitinius sprendinius. Plačiausiai naudojamas parametras, charakterizuojantis medžiagos pasiskirstymą tarp skystos ir kietos fazių, yra pasiskirstymo koeficientas K_d . Įvairių teršiančių medžiagų sorbcinė ir desorbcinė geba yra skirtinga, dažnai priklauso nuo aplinkos pH rodiklio ir

organinių medžiagų. Radionuklidų migraciją labai įtakoja į kapinyną patekę krituliai. Vandens išplauti radionuklidai advekcijos ar difuzijos pernašos būdu gali patekti į žemiau esančią aeracijos zoną. Aeracijos zonos porose esantis vanduo radionuklidus gali pernešti į žemiau esantį gruntinį vandeningą sluoksnį.

Radioaktyviųjų atliekų laidojimo sistemos sauga priklauso nuo kiekvieno ją sudarančio komponento funkcionalumo: inžinerinių ir gamtinių barjerų, tolimesnės aplinkos. Apdangalas, barjerai ir naudojamos medžiagos turi didelę reikšmę, kadangi nuo jų priklauso vandens filtracija ir radionuklidų migracija. Praeityje, kaip rodo praktika, buvo skirta per mažai dėmesio medžiagos parinkimui, o tai gali įtakoti vandens filtracijos procesus ir radionuklidų patekimą į aplinką. Šiuo metu jau yra sukaupta apie 50 metų patirtis radioaktyviųjų atliekų laidojimo srityje. Per tą laikotarpį buvo tiriami įvairūs inžineriniai ir gamtiniai barjerai bei įvairios juos sudarančios medžiagos. 1990 metų pradžioje Tarptautinė atominės energijos agentūra (TATENA) inicijavo mokslinį projektą, skirta saugos analizės, barjerų ir medžiagų parinkimo patirties apibendrinimui (Performance..., 2001). Projektas buvo vykdomas 1991–1995 metais.

Pagrindiniai šio projekto metu nagrinėti klausimai:

- inžinerinių barjerų taikymas;
- medžiagos inžineriniams barjerams parinkimas;
- parinktų medžiagų sauga.

Kapinyno koncepcijos parinkimas priklauso nuo daugelio dalykų: klimato, atliekų kiekio ir rūšies, geologinių ir hidrogeologinių sąlygų, taip pat kapinyno koncepcija turi užtikrinti atitikimą radiacinės saugos reikalavimams. Kapinyną paskirtis yra izoliuoti radioaktyvias atliekas (pvz., kontroliuojant vandens kontaktą su atliekomis ir siekiant jo išvengti, užtikrinant radioaktyvumo sumažėjimą dėl natūralaus skilimo ar kontroliuojant dispersijos procesą). Atliekos turi būti saugiai izoliuotos nuo biosferos, aplinkoje radionuklidų koncentracija negali viršyti tam tikro nustatyto lygio laidojimo metu. TATENA rekomenduoja, kad kapinynas turi būti įrengtas taip, kad

metinė efektinė dozė gyventojui nebūtų didesnė nei 1 mSv/metai, šalys dar taiko šios dozės apribojimą, kuris šiek tiek skiriasi įvairiose šalyse, o Lietuvoje – 0,2 mSv/metai (HN 87:2002..., 2003). Galimi įvairūs radionuklidų pernašos su vandeniu iš kapinyno į aplinką keliai:

- dėl vandens infiltracijos nuo žemės paviršiaus;
- dėl gruntinio vandens intruzijos į kapinyną ir, kaip pasekmės, užteršto vandens nutekėjimo į aplinką;
- dujinės formos radionuklidų sklaida.

Vandeniui pasiekus atliekas dėl konvekcijos ir dispersijos radionuklidai pernešami į aeracijos zoną ir gruntinį vandenį (Mažeika, Petrošius, 1995). Matematiniam šių procesų aprašymui naudojami advekcijos-dispersijos lygties sprendiniai bei patikimos pernašos parametrų vertės.

Radionuklidų pernašą aeracijos zonoje išreiškiama (Sullivan, 1993):

$$\frac{\partial}{\partial t}(R\theta C) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\theta D \frac{\partial C}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial x}(qC) - \lambda_d \theta RC, \quad (1.1)$$

čia C – radionuklido savitasis aktyvumas (koncentracija) (Bq/m^3); θ – grunto tūrinė drėgmė (-); D – difuzijos-dispersijos koeficientas (m^2/para); q – vandens tėkmės greitis (m/s); λ_d – radioaktyvaus skilimo konstanta ($1/\text{para}$); R – sulėtinimo faktorius (-); t – laikas (para); x – atstumas vandens judėjimo kryptimi (m).

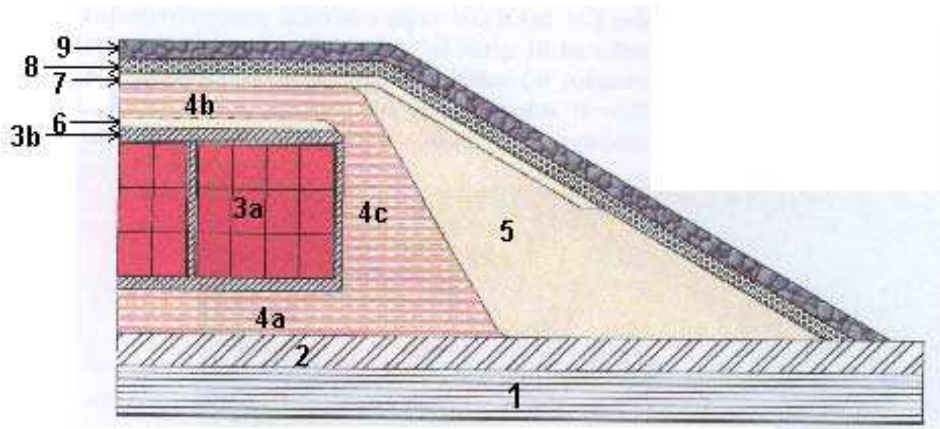
1.3. Paviršinio kapinyno koncepcija Lietuvoje

Paviršinio kapinyno Lietuvoje koncepcija parengta išnagrinėjus analogiškų kapinynų kitose šalyse (Japonijoje, Prancūzijoje, Ispanijoje, Slovakijoje) projektus ir eksploatavimo patirtį. Įvertinus Lietuvos gamtinių sąlygų ypatumus, atlikus poveikio aplinkai vertinimą buvo pasirinkta pilkapijo tipo daugiabarjerė konstrukcija (Paviršinio..., 2007). Tai tokia konstrukcija, kai įrengiama vienas kitą papildančių natūralių ir dirbtinų barjerų sistema,

patikimai izoliuojanti radioaktyvias atliekas ir apsauganti aplinką nuo galimos taršos. Radioaktyviosios atliekos kapinyne bus laidojamos apytiksliai iki 2030 metų, kol bus išmontuota IAE ir baigtos apdoroti susidariusios atliekos. Baigus laidoti radioaktyvias atliekas, kapinynas bus uždarytas įrengiant reikalingus inžinerinius barjerus. Šis etapas vyks pagal detalų kapinyno uždarymo planą. Visiškai įrengto paviršinio kapinyno inžinerinius barjerus sudarys gelžbetoniniai rūsiai, iš visų pusių apsupti mažai vandeniui laidaus molio, o visą sistemą dengs ilgaamžis, daugiasluoksnis, erozijai atsparus kaupo pavidalo gaubtas. Uždarytas kapinynas bus prižiūrimas ne mažiau kaip 300 metų (Paviršinio..., 2007). Pasibaigus aktyvios priežiūros laikotarpiui, bus vykdoma pasyvi priežiūra (ne trumpiau, negu 200 metų). Pasyvios priežiūros metu kapinyno teritorijoje bus ribojamas žemės panaudojimas. Prireikus ar paaiškėjus naujai informacijai, uždaryto kapinyno priežiūros laikotarpiai gali būti prailginti, o apsauginiai barjerai atstatomi net ir praėjus 300 metų arba atliekos išrūšiuojamos.

Radionuklidų migraciją iš kapinynų sulaiko gamtiniai ir inžineriniai barjerai: atliekų sukietinimo rišamoji medžiaga (betonas), betoniniai konteineriai, tarpų tarp konteinerių užpildas, betoninis rūsys, vandeniui nelaidaus molio sluoksnis, kapinyną supantis natūralus gruntas. Pagal TATENA radioaktyviųjų atliekų paviršinių kapinynų saugos įvertinimo ISAM metodologiją (Safety Assessment Methodologies..., 2004) buvo vertinama galima radionuklidų migracija bei šios migracijos sąlygotas jonizuojančiosios spinduliuotės poveikis žmogui ir aplinkai (Mažeika, 2006).

Talpykla bus įrengta virš gruntinio vandens slūgsojimo lygio. Radionuklidams migruoti į aplinką neleis keli vienas kitą papildantys dirbtiniai ir gamtiniai barjerai (1 pav.). Dėl tam tikrų veiksnių, pvz. inžinerinių barjerų degradacijos, radionuklidai gali patekti į aplinką ir pasklisti aplinkoje (Radioaktyviosios atliekos..., 2006).



1 pav. Radioaktyviųjų atliekų kapinyno konceptualios konstrukcijos schema (Reference..., 2002). 1 – natūralus pagrindas; 2 – išlyginimo sluoksnis. 3a – atliekų konteineris, 3b – rūšio sienos, grindys, danga; 4 molio klotas-užpildas: 4a – pagrindo užpildas, 4b – dengiantis užpildas; 4c – šoninis užpildas; 5 – šlaitų formavimo sluoksnis; 6 – dujų kolektorius; paviršinis barjeras – gaubtas; 7 – dulkingo smėlio sluoksnis; 8 – žvyro sluoksnis; 9 – riedulių-gargždo sluoksnis.

1.4. Saugos analizės principai

Radioaktyviųjų atliekų kapinyno saugos vertinimas turi būti atliekamas projektavimo, eksploatacijos metu ir po jo uždarymo. Skirtinguose kapinynų eksploatacijos ir uždarymo etapuose saugos vertinimas turi skirtingus tikslus. Radioaktyviųjų atliekų laidojimas turi užtikrinti, kad kapinynų aikštelės netaptų ekologinėmis problemomis būsimoms kartoms. Vertinant kapinyno saugą taikomi įvairių procesų kompiuteriniai modeliai. Paviršinio kapinyno sistemos konceptualų modelį sudaro bendrų savybių aprašymas ir detalios charakteristikos. Laikui bėgant sistemos charakteristikos keičiasi dėl gamtos reiškinių ir žmogaus veiklos, t.y. pagal tam tikrus scenarijus. Scenarijuose nagrinėjami laipsniški ar staigūs gamtos ar kitų sąlygų pokyčiai, kurie laikui bėgant gali įtakoti kapinyno saugą. Scenarijų analizė reikalauja identifikavimo ir išaiškinimo tų reiškinių, kurie gali inicijuoti arba padidinti radionuklidų patekimą į aplinką. Viso saugos vertinimo laikotarpio eigoje galimas

papildomas duomenų surinkimas, kuris orientuotas į tam tikrus parametrus, kurie reikalingi kapinyno saugai užtikrinti (Yim et al., 2000).

Pagal tikslią paskirtį saugos analizės modeliai skirstomi į 3 pagrindines grupes:

- pirma grupė – paviršiniai modeliai;
- antra grupė – pernašos modeliai;
- trečia grupė – dozės / poveikio modeliai.

Paviršiniai modeliai apima esančių įrenginių degradacijos ir radionuklidų nutekėjimo į aplinką analizę. Jų realizavimui reikia kapinyno įrenginių, gamtinės aplinkos parametrų, kapinyno degradacijos (grunto užpilas, cemento barjerai, atliekų konteineriai), infiltracijos per gamtinius bei inžinerinius barjerus apibūdinimo ir radionuklidų išskyrimo iš kapinyno ir jų pernašos į aplinką įvertinimo.

Pernašos modeliai realizuoja matematinį radionuklidų judėjimo tam tikrame aplinkos komponente (ore, paviršiniame vandenyje, požeminiame vandenyje, biotoje) aprašymą. Radionuklidų pernašos modelių tikslas – prognozuoti radionuklidų koncentraciją tam tikrame aplinkos komponente.

Visi modeliai jungiami į bendrą modelį, kuris naudojamas labiausiai jautraus objekto (pvz., gyventojų kritinės grupės) maksimalios dozės vertinimui. Saugos vertinimas apima dozės kaitos prognozę 1000 metų ir daugiau. Saugos analizės sėkmė priklauso nuo atliekų apibūdinimo, įrenginių charakteristikų ir parinktos aikštelės gamtinių sąlygų duomenų kokybės.

Radionuklidų patekimui iš kapinyno į aplinką turi įtakos vandens infiltracija, kurią itin sąlygoja drėgmės pernašos procesai inžineriniuose barjeruose ir aeracijos zonoje. Kadangi infiltracija priklauso nuo drėgmės natūralaus sunkimosi ir inžinerinių barjerų charakteristikų, todėl bendrai radionuklidų pernašos prognozei svarbus aeracijos zonos charakterizavimas ir drėgmės pernašos per inžinerinius barjerus (kapinyno apdangalas, betoninės talpyklos) ir aeracijos zoną modeliavimas. Dažniausiai infiltracijos procesas modeliuojamas ilgesniam laiko tarpui ir labai apibendrintai (Performance..., 2000).

Saugos analizė yra visų funkcinių rodiklių vertinimas, įskaitant potencialų poveikį žmogaus sveikatai bei aplinkai. Potencialų poveikį sąlygoja tam tikri pastoviai veikiantys veiksniai, pvz., barjerų degradacija, besireiškianti kaip cheminiai, biologiniai ir radiologiniai procesai, dėl kurių susidaro dujos ir / arba šiluma, vyksta korozija, metalo “senėjimo” procesai. Visa tai gali turėti įtakos radioaktyviųjų atliekų izoliacijai.

1.5. Drėgmės pernašos aeracijos zonoje ypatumai

Aeracijos zonos tyrimai Lietuvoje buvo atliekami požeminio vandens išteklių klausimams spręsti, tačiau tyrimų mastas nebuvo didelis. 1980–1995 m. V. Žemaitis atliko aeracijos zonos tyrimus specialiai įrengtose stebėjimo stotyse, pateikė tipišku Lietuvos aeracijos zonos nuogulų drėgmės judėjimo koeficientų duomenis (Žemaitis ir kt. 1995). 1994 m. P. Klizas parengė aeracijos zonos tyrimams skirtą disertacinį darbą “Drėgmės migracijos ir vandens filtracijos neįsotintose uolienose laboratoriniai ir lauko įvertinimai”. Pagrindinis atliktų eksperimentinių tyrimų tikslas – įvertinti aeracijos zonos uolienuų geofiltracinių procesų, vykstančių aeracijos zonos smėlinguose gruntuose svarbą gruntinio vandens taršai. Pastarieji tyrimai buvo atliekami Nešatelio universiteto (Šveicarija) specializuotoje laboratorijoje. M. Dobkevičius tyrė aeracijos zonos uolienuų filtracines savybes, pirmasis nustatė uolienuų filtracijos koeficiento periodinį kitimą laike (Visuotinė..., 2006) ir aprašė gruntinio vandens infiltracinės mitybos ir drėgmės judėjimo aeracijos zonoje hidrodinaminius pagrindus (Dobkevičius, 2001), taip pat atliko vandens įpylimo į šurfus aeracijos zonoje eksperimentinius tyrimus (Dobkevičius, 2002). A. Dobkevičius parengė habilitacinį darbą „Aeracijos zonos uolienuų filtracinių savybių nustatymo metodų tyrimas ir tobulinimas (Lietuvos teritorijos pavyzdžiu)“, kuriame buvo išaiškinti aeracijos zonos birių uolienuų filtracinių savybių formavimosi dėsningumai ir patikslinti kai kurie savybių nustatymo metodai.

Aeracijos zona (unsaturated zone, aeration zone, vadose zone) – tarp žemės paviršiaus ir gruntinio vandens esantis sluoksnis, kur laikosi plėvelinis, kapiliarinis vanduo, vandens garai ir oras. Apatinė aeracijos zonos riba – gruntinio vandens lygis. Aeracijos zonos storis metų bėgyje nėra pastovus. Vandens judėjimas per aeracijos zoną priklauso nuo grunto drėgmės laipsnio, jeigu drėgmė yra mažesnė nei didžiausia molekulinė drėgmė, tai vanduo, pirmiausia sudrėkina gruntą. Kai vandens patenka nedaug, tai jis visas gali papildyti fiziškai surištą vandenį. Įsisunkus dideliame kiekiui vandens, papildomas ir gruntinis vanduo. Esant dideliame kritulių kiekiui, dirvožemio vanduo gali tapti gravitaciniu, drėgmė iš dirvožemio filtruojasi į gilesnius aeracijos zonos sluoksnius. Tačiau jei yra mažas atmosferinių kritulių kiekis, o išgaravimas intensyvus, tada drėgmė iš šios zonos nepatenka į gilesnius sluoksnius ir grįžta atgal į atmosferą. Jeigu yra hidraulinis ryšis tarp infiltracinio srauto ir gruntinio vandens, tai yra papildomas gruntinis vanduo. Jeigu ne, tai vanduo užsilaiko nepilnai prisotintos aeracijos zonos porose. Drėgmės išgaravimas priklauso nuo aeracijos zonos storio, kuo ji plonesnė tuo daugiau išgaruoja drėgmės, tačiau ši priklausomybė nėra tiesinė (Dobkevičius, 2001). Tiriant infiltracinį srautą aeracijos zonoje išskiriamos trys zonos: dirvožemio, vadosinė (palyginti mažos drėgmės) zona ir artima pilnam prisotinimui – kapiliarinė. Kapiliarinė zona susidaro virš gruntinio vandens, todėl turi glaudų hidraulinį ryšį su juo. Pažemėjus gruntinio vandens lygiui, pažemėja ir kapiliarinio pakilimo zona ir atvirkščiai – pakilus gruntinio vandens lygiui, pakyla ir kapiliarinio pakilimo zona. Vandens pakilimo aukštis kapiliarinėje zonoje taip pat priklauso nuo porų skersmens (atvirkščiai proporcingas), aeracijos zonos gruntų vienalytiškumo, mineralinių dalelių formos, taip pat ir nuo skysčio savybių – tankio ir temperatūros. Vandens pakilimas yra aukštesnis molinguose gruntuose, kadangi poros molingame grunte yra mažesnio skersmens negu smėlinguose. Vanduo, sąlytyje su kietu kūnu, drėkina jo paviršių, ir dėl paviršiaus įtampos jėgų jo paviršius išsikreivina bei pakyla, susidarant meniskui. Dėl paviršiaus įtampos ir menisko kreivumo susidaro menisko jėga, kurios dėka dėl slėgio skirtumo paviršiuje ir

kapiliaruose vanduo kapiliaruose kyla. Šis kilimas vyksta tol, kol kapiliaruose vandens stulpelio hidrostatinis slėgis susilyginus su menisko jėga. Viršutinė uolienu kapiliarinės zonos riba atskiriama pagal ryškiai pakitusį uolienu prisotinimo vandeniu laipsnį. Kapiliarinėje zonoje uoliena yra pilnai prisotinta ir jos drėgmė yra pati didžiausia. Kylant į viršų, kur beveik ištiesai yra oras, drėgmė staigiai sumažėja ir tai reiškia, kad prasidėjo plėvelinio vandens zona. Kapiliarinio pakilimo aukštis priklauso ne tik nuo kapiliaro skersmens, bet ir nuo grunto grūdelių vienodumo, formos, jų susiklostymo pobūdžio, skysčio tankio ir temperatūros (Mallants, 2006):

$$h_c = \frac{2\gamma \cos \alpha}{rg\rho_w}, \quad (1.2)$$

čia γ – paviršiaus įtempimo koeficientas ($7,27 \times 10^{-2}$ kg/s² esant 20°C), ρ_w – vandens tankis (998 kg/m³ esant 20°C), α – drėkinimo kampas (priimame $\alpha=0$), g – laisvojo kritimo pagreitis (9,81 m/s²), r – kapiliaro spindulys (m).

Ši lygtis teoriškai gali būti naudojama kapiliarinio pakilimo aukščio skaičiavimui grunto porose. Kadangi grunto poros yra nevienalytės, kapiliarinio pakilimo aukščio grunte skaičiavimas yra sudėtingas.

Infiltracija yra vienas iš svarbiausių procesų, nuo kurio priklauso, kiek kritulių, o kartu ir galimų teršalų patenka į gruntą ir kiek pereina į paviršinių nuotėkį, taip pat svarbus procesas turintis įtakos erozijai. Laikui bėgant, vykstant infiltracijai, drėgmės frontas per gruntą juda žemyn. Stambiagrūdžiame grunte, esant siauram porų dydžio pasiskirstymui, drėkinimas bus staigus, o smulkiagrūdžiame – labiau difuzinis. Drėkinimas yra kombinacija iš papildymo nauju kritulių vandeniu ir senesnio vandens perkėlimo giliau. Pradinėmis sąlygomis drėgmės frontas yra grunto paviršiuje ir vandens potencialo gradientas yra labai didelis. Drėgmei judant žemyn, gradientas žemės paviršiuje mažėja, ir tai turi didžiausią efektą hidraulinio laidžio funkcijos $K(h)$ padidėjimui. Galų gale, kai drėgmės potencialo

pasiskirstymas pasiekia vienetinį gradientą, t.y. tame taške asimptotiškai pasiekia išotintos zonos būseną.

Aeracijos zonoje didesnės poros nusausėja lengviau negu mažos, tai yra iš kapiliarinio pakilimo jėgos rezultatas. Esant labai mažam vandens tūriui aeracijos zonoje, drėgmė gali judėti dujinėje fazėje.

Drėgmės judėjimui aeracijos zonoje didelės įtakos turi dviejų fazių – vandens ir oro buvimas. Oras čia yra laisvos būsenos ir siejasi su atmosfera. Oras gali būti mobilus ir nemobilus (Faybishenko, 1995). Vykstant infiltracijai, mobilus oro kiekis yra išstumiamas iš smulkesnių porų į didesnes. Tam, kad visas mobilus oras pasiektų paviršių, gali užtrukti ištisas dienas. Oro ir vandens santykis, t. y. grunto prisotinimo vandeniu laipsnis, yra lemiantis drėgmės judėjimo veiksnys, nuo kurio priklauso vidinių jėgų, veikiančių drėgmę porose, pobūdis ir intensyvumas. Kuo mažesnis uolienos prisotinimo drėgmė laipsnis, tuo sudėtingesnis yra šių jėgų poveikis ir kartu drėgmės judėjimo mechanizmas (Faybishenko, 1995). Oro kiekis sumažina vandens judėjimui tinkama skerspjūvio plotą ir vandens potencialo gradientą, todėl galutinis infiltracijos greitis yra mažesnis negu filtracijos greitis prisotintoje zonoje.

Laminarinio vandens judėjimo prisotintoje poringoje terpėje dėsningumus nustatė prancūzų mokslininkas A. Darsis (Darcy) eksperimentiniu būdu 1856 m. (Darcy, 1856). Filtruodamas vandenį pro įvairaus skersmens vamzdžius, užpildytus įvairios granulometrinės sudėties smėliais, jis pastebėjo, kad vandens debitas priklauso nuo smėlio poringumo ir yra tiesiogiai proporcingas vamzdžio ir veikiančiam slėgiui bei atvirkščiai proporcingas filtracijos keliui (gradientas) (Jury et al., 1991). Pagrindinis geofiltracijos dėsnis sieja geofiltracijos srauto debitą su spūdžio pokyčiu ir nusako srauto energijos suvartojimą. Esant laminariniam judėjimui vandens geofiltracija vyksta pagal tiesinę priklausomybę. Darsio dėsnis išreiškia tiesinę priklausomybę tarp filtracijos greičio ir spūdžio gradiento. Neigiamas ženklas nurodo, kad tėkmė yra mažesnės energijos link (Darcy, 1856).

$$q = -K \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{Q}{A}, \quad (1.3)$$

čia K – vandens filtracijos greitis, priklausantis nuo užpildo savybių, ir pavadintas filtracijos koeficientu (m/para), $\frac{\partial H}{\partial z}$ – spūdzio gradientas (-); Q – debitas (m^3/para); A – skerspjūvio plotas (m^2). Neprisotintos terpės atveju:

$$H = \frac{\psi_w}{\rho_w g} = h + z, \quad (1.4)$$

čia g – laisvojo kritimo pagreitis ($9,81 \text{ m/s}^2$); ρ_w – vandens tankis (g/cm^3); ψ_w – vandens potencialas (-); h – įsiurbiamasis slėgis (m); z – taško, kuriame nustatomas spūdis koordinatė (m).

Virš gruntinio vandens lygio egzistuoja nuo kelių iki keliasdešimties metrų storio aeracijos zona, kur dalis porų yra užpildyta oru. Oru užpildytos poros lemia vandens srauto sumažėjimą. Kapiliarinės jėgos suriša vandenį su grunto dalelėmis, sukeldamos neigiamą slėgį. Įsiurbiamasis slėgis yra vienas svarbiausių aeracijos zonų rodiklių, nurodančių aeracijos zonos prisotinimo vandeniui laipsnį. Įsiurbiamasis slėgis nepilnai prisotintame uolienoje priklauso nuo uolienos drėgmės. Ši priklausomybė yra viena svarbiausių grunto charakteristikų, vertinant drėgmės judėjimą. Žinant įsiurbiamojo slėgio duomenis skirtingais laiko momentais, galima nustatyti drėgmės migracijos aeracijos zonoje kryptį – žemyn ar aukštyn, nes drėgmė juda mažesnės soties link. Mažėjantis srautas mažina hidraulinį laidumą. Darsio dėsnis, kuomet atsižvelgiama į hidraulinio laidumo priklausomybę nuo grunto drėgnio (Sposito, 1986), vadinamas Buckinghamo-Darsio dėsnium.

$$q = -K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z}, \quad (1.5)$$

$$q = -K(h) \frac{\partial H}{\partial z} = -K(h) \frac{\partial(h+z)}{\partial z} = -K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right). \quad (1.6)$$

čia K – filtracijos koeficientas (m/para); $\frac{\partial H}{\partial z}$ – spūdzio gradientas (-); h – įsiurbiamasis slėgis (m); z – taško, kuriame nustatomas spūdis koordinatė (m).

Aeracijos zonos hidraulinio laidžio $K(h)$ funkcija yra netiesinė ir priklauso nuo grunto drėgno ir nuo įsiurbiamojo slėgio. Esant mažam slėgiui (mažas drėgmės imlumas), neįsotintos zonos hidraulinis laidis yra didesnis molyje negu smėlyje. Molyje hidraulinis laidis mažėja palaipsniui dėl porų dydžio pasiskirstymo. Aeracijos zonos hidraulinis laidis stambiagrūdžiame grunte mažėja greičiau negu smulkiagrūdžiame. Pasiekus tam tikrą h , $K(\theta)$ stambiagrūdžiame grunte mažesnis negu smulkiagrūdžiame. Buckinghamo-Darsio lygtis galioja aeracijos zonoje, kai drėgmė (θ) išlieka pastovi tam tikrą laiką.

2 lentelė. Aeracijos ir įsotintos vandeniu zonų savybės.

Parametras	Įsotinta zona	Aeracijos zona
Vandens tūris	Pastovus	Kaitus su laiku ir erdvėje
Oro kiekis	Nulis (arti nulio)	Kaitus laike ir erdvėje
Hidraulinis gradientas	Teigiamas	Neigiamas ir kaitus
Hidraulinis laidis	Maksimalus, pastovus	Žemas, kaitus
Garų srautas	Nėra	Galimas
Vandens srautas	Pastovus, priklauso nuo gradiento	Gali būti pastovus ir nepastovus, priklauso nuo įsiurbimo slėgio
Tėkmės kelias	Vientisas	Vingiuotas
Vandens judėjimas	Darsio dėsnis	Buckinghamo-Darsio dėsnis ir Richards'o lygtis
Filtracijos (hidraulinio laidžio) parametras	K_s	$K(\theta)$

1.6. Izotopiniai tyrimai aeracijos zonoje ir kitose vandens sistemose

Izotopai – cheminių elementų atmainos, turinčios vienodą branduolio krūvį, bet skirtingą atominę masę. Kadangi skirtingi to paties elemento izotopai praktiškai nesiskiria cheminėmis savybėmis, todėl juos atskirti būna sunku. Izotopai skiriasi branduolio sandara (neutronų skaičiumi) bei branduolio savybėmis (radioaktyvaus skilimo pusėjimo trukme, radioaktyvumo pobūdžiu, kritine mase ir pan.). Vienodą skaičių protonų turintys branduoliai priklauso tam pačiam elementui, bet neutronų skaičius tokiuose branduoliuose gali skirtis. Daugumoje atvejų skirtingi to paties elemento izotopai savo atominė mase skiriasi nežymiai. Tačiau vandenilio izotopų masės skiriasi iš esmės. Protis yra lengviausiais vandenilio izotopas (vandenilio atomas, sudarytas iš 1 protono ir 1 elektrono), deuteris – du kartus už jį sunkesnis (1 protonas, 1 neutronas ir 1 elektronas) ir tritis – tris kartus sunkesnis (1 protonas, 1 elektronas ir 2 neutronai). Šiuos izotopus gana nesunkiai galima atskirti elektrolizės būdu. Kai kurie izotopai smarkiai skiriasi savo branduolių savybėmis: vieni yra stabilūs – jų branduolių sudėtis bėgant laikui nekinta; kiti – laikui bėgant skyla į kitų elementų izotopus ir todėl vadinami radioaktyviais. Radioaktyvūs izotopai dar yra vadinami radioizotopais arba radionuklidais (Mook, 2000).

11,1% vandens masės sudaro vandenilis ir 88,9% – deguonis. Vandens molekulę dažniausiai sudaro vienas deguonies atomas, kurio atominė masė yra 16 ir du vandenilio atomai, kurių atominė masė – 1. Visos vandens molekulės masė yra 18. To paties elemento skirtingų izotopų paplitimas apibūdinamas skirtingos masės izotopų paplitimo santykiais. Deguonies atomas turi 11 izotopų atmainų, kurių atominė masė kinta nuo 12 iki 22. Tačiau gamtiniame vandenyje daugiausia itin paplitęs lengvasis deguonies-16 izotopas, kuris yra stabilus, ir sudaro 99,763%, ^{18}O – vos 0,2% (Nier, 1950).

Įsifiltravęs į gruntą vanduo įgyja tam tikrą izotopinę sudėtį. Radioizotopų taikymas leidžia suskaičiuoti požeminio vandens cirkuliacijos

laiką, įvertinti požeminio vandens atsinaujinimą. Žinant įeinamąją tričio koncentraciją arba jos pasiskirstymą, tričio koncentraciją gruntiniame vandenyje ir gruntinio vandens slūgsojimo gylį, galima nustatyti vertikalios infiltracijos greitį.

Stabilieji izotopai, kaip ir radioaktyvieji, plačiai taikomi aplinkos problemų tyrimuose. Nagrinėjant izotopus vandenyje, galima gauti informacijos apie vandens kokybę, jo geocheminę evoliuciją, mitybos procesus, užterštumo procesus. Taikant izotopus vandens tyrimuose, būtina žinoti jų variacijas krituliuose laiko bėgyje, nes jos sudaro įeities į sistemą signalą, kurio pėdsakai tyrinėjami vandenyje. Deguonies ir vandenilio izotopai yra idealūs traseriai, nes jie įeina į vandens molekulės sudėtį, yra inertiški, nereaguoja su molio mineralais ir grunto dalelėmis. Stabilųjų izotopų sudėtis gali suteikti informacijos apie daugelį hidrologinių ir hidrogeologinių procesų bei parametrų (pvz., garavimas, infiltracija, vandens apykaitos ypatumai).

Izotopinių tyrimų metodų taikymas vandens sistemų funkcionavimo ypatumų atskleidimui plačiai pradėtas XX a. viduryje. Radioaktyviųjų izotopų taikymo hidrologijoje ir hidrogeologijoje pradininkas yra W. F. Libby, kuris 1947 m. atliko tričio tyrimus gamtiniame vandenyje. 1947 m. H. C. Urey, remdamasis cheminių elementų izotopų savybėmis, sprendė geochemines problemas, todėl jis yra laikomas stabilųjų izotopų tyrimų pradininku. Apie 1960-uosius metus buvo atlikta daug darbų apie kritulių ir paviršinio vandens izotopinę sudėtį. H. Craig ir L. I. Gordon (1965) modeliavo nuo laisvo vandens paviršiaus garuojančio vandens izotopinę sudėtį pagal Fick'o dėsnį. 1964 m. W. Dansgaard'as nustatė linijinį ryšį tarp paviršiaus oro temperatūros ir stabilijų izotopų santykio ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) vidutiniams metiniams krituliams globaliu mastu. Septintame dešimtmetyje U. Zimmermann ir kt (1967) tyrinėjo izotopinę sudėtį poringoje terpėje išotintuose smėliuose, bandymuose su įvairiomis augalų rūšimis tyrinėjo išgaravimo efektą. Vėliau tyrimus aeracijos zonoje atliko K. O. Munnich ir kt. (1980), G. B. Allison (1982), J. C. Fontes (1983). 1988 metais C. J. Bames, G. B. Allison (1988) apibendrino didžiąją darbų, skirtų aeracijos zonos izotopinės sudėties tyrimams. Aštuntame

dešimtmetyje J. C. Fontes (1986) Saharoje tyrinėjo grunto drėgmės izotopinę sudėtį aeracijos zonoje. Šių darbų pagrindu buvo išvystyti išgaravimo rodiklių nustatymo izotopiniai metodai. Svarbus yra P. Maloszewskio ir kt. (1995) darbas, kuriame jis panaudojo kritulių $\delta^{18}\text{O}$ ir $\delta^2\text{H}$ duomenis infiltracijai per sąvartynus nustatyti.

Apie 1960 m. taip pat daug darbų buvo skirta kritulių ir paviršinio vandens izotopinės sudėties tyrimams. Pirmąjį ir labai reikšmingą informacijos apie izotopų santykius gėlame vandenyje ir krituliuose pasauliniu mastu apibendrinimą atliko H. Kreigas 1961 metais. Tais pačiais metais, pagal (TATENA) ir Pasaulines Meteorologijos Organizacijos (PMO) programą buvo pradėti stabilųjų izotopų ir tričio tyrimai mėnesio krituliuose. Duomenys apie kritulių izotopinę sudėtį yra kaupiami nuo 1961 metų TATENOS duomenų bazėse (Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) ir apima daugiau nei 800 meteorologinių stočių iš 101 šalies. Pagal šią programą yra vykdomi $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ ir ^3H matavimai. Rezultatai yra reguliariai papildomi ir prieinami internetiniame puslapyje:

<http://nucleus.iaea.org/sso/NUCLEUS.html?exturl=http://isohis.iaea.org/>.

Meteorinio vandens deguonies ir vandenilio izotopų santykiai ($\delta^{18}\text{O}$ ir $\delta^2\text{H}$) yra tarpusavyje susiję, o jų sąryšis žinomas kaip Globali Meteorinio Vandens Linija (GMVL) (Global Meteoric Water Line, GMWL).

Yra nemažai darbų, kur stabilūs izotopai naudojami kaip gamtiniai traseriai (pvz. Peters N. E. Leibundgut 1993; Koeniger P., Leibundgut C., Link T., John D. 2009; Adar, E. M., Leibundgut C. 1995; Leibundgut C. 1995; Kendall C., McDonnell J. J. 1998). Traserių naudojimas yra viena iš priemonių charakterizuoti vandens buvimą sistemoje, vandens ir teršalų migraciją hidrogeologinėje sistemoje.

Lietuvoje daug vandens objektų izotopinių tyrimų buvo atlikta, vykdamt priešprojektinius IAE tyrimus bei ją pastačius, o nuo 1978 m., su pertraukomis buvo vykdomas kai kurių vandens objektų izotopų monitoringas. Taip pat požeminio vandens izotopiniai tyrimai buvo atliekami, vykdamt planuojamos Visagino AE aikštelių tyrimus. Tričio koncentracijos tyrimai buvo atliekami ne

tik gruntiniame vandenyje, bet ir paviršiniame vandenyje – kai kuriose upėse ir ežeruose, Baltijos jūroje, Kuršių mariose. Taip pat vykdomi nuolatiniai matavimai krituliuose. Apie izotopinių metodų taikymą hidrogeologijoje paskelbta nemažai darbų ne tik užsienyje, bet ir Lietuvoje (Mažeika, 2002, 2006; Juodkasis, 1995; Mažeika, Petrošius, 1995; Mokrik, Mažeika, 2006; Mokrik et al., 2008; Zuzevičius et al., 2007).

1.7. Aeracijos zonos matematiniai modeliai

Nagrinėjant vandens judėjimo grunte problemas, įvairių diferencialinių lygčių sprendimui skaitiniai metodai buvo pradėti plačiausiai naudoti tuomet, kai buvo sukurti pakankamai didelių greičių kompiuteriai (3 lentelė).

3 lentelė. Kompiuterinėse programose realizuotų skaitinių modelių pavyzdžiai.

Modelis	Skaitinis metodas	Transportas	Autoriai
SUTRA	Baigtiniai elementai	Vandens ir priemaišų	Voss (1984)
VS2DT	Baigtiniai skirtumai	Vandens ir priemaišų	Lapalla et al. (1987) Healy (1990)
VAM2D	Baigtiniai elementai	Vandens ir priemaišų	Huyakorn et al. (1988)
WORM	Baigtiniai elementai	Vandens ir priemaišų	van Genuchten (1987)
SWMS-2D	Baigtiniai elementai	Vandens ir priemaišų	Šimunek et al. (1998)
SWMS-3D	Baigtiniai elementai	Vandens ir priemaišų	Šimunek et al. (1995)
SWIM	Baigtiniai skirtumai	Vandens	Ross (1990)
HYDRUS-1D	Baigtiniai elementai	Vandens ir priemaišų	Šimunek et al. (1998)
HYDRUS-2D	Baigtiniai elementai	Vandens ir priemaišų	Šimunek et al. (1996)
HYDRUS-2D/3D	Baigtiniai elementai	Vandens ir priemaišų	Šimunek et al. (2007)

Pagrindiniai modelio sudarymo žingsniai yra šie:

1. tikslų apibrėžimas;
2. fizikinę sistemą apibūdinančių duomenų surinkimas ir jų apdorojimas;

3. tiriamą sistemą atspindinčio supaprastinto konceptualaus modelio sudarymas;
4. skaičiavimo programos parinkimas;
5. pagrindinės hidrogeologinės schemos sudarymas ir ribinių sąlygų pagrindimas;
6. daugiavariantinis modeliavimas (skaičiavimai);
7. tikslinių uždavinių sprendimas;
8. rezultatų failų paruošimas ir jų interpretavimas, duomenų atvaizdavimas ir interpretavimas.

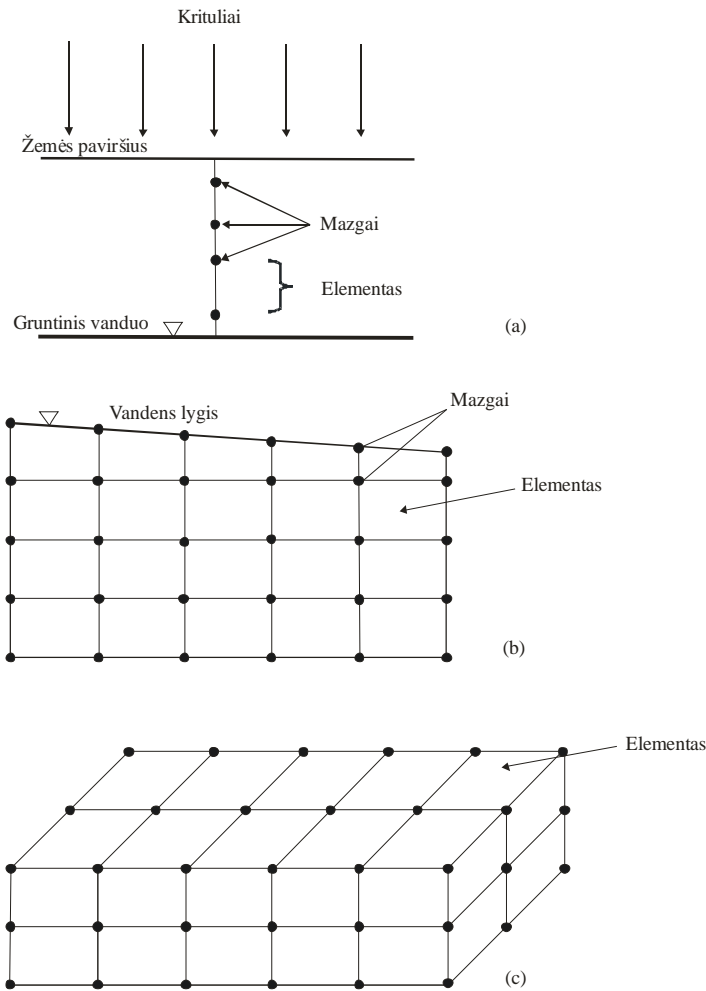
Šiuo metu gausu matematinio modeliavimo priemonių, leidžiančių prognozuoti vandens ir jose esančių priemaišų pernašą tarp žemės ir gruntinio vandens paviršių. Drėgmės srautas skirtingo prisotinimo gruntuose aprašomas Richards'o lygtimi, o priemaišų pernaša (drėgmės ir joje esančių medžiagų judėjimas nepriklausomai nuo jį lemiančių procesų (filtracija, kapiliarinės jėgos, dispersija, difuzija) – Fick'o konvekcijos-dispersijos lygtimi. Nagrinėjant drėgmės pernašos aeracijos zonoje klausimus netolimoje praeityje aeracijos zonos procesai dažnai buvo labai supaprastinami arba apskritai jų buvo nepaisoma. Dauguma prieinamų aeracijos zonos modelių remiasi minėta Richards'o lygtimi (Richards, 1931) arba kinematinės bangos lygtimi (Colbeck, 1972; Smith, 1983; Smith, Hebbert, 1983). Richards'o lygtyje drėgmės judėjimas grunte aprašomas, atsižvelgiant į kapiliarines ir gravitacines jėgas, o kinematinės bangos lygtyje atsižvelgiama tik į gravitacines jėgas. Turint omenyje aeracijos zonos sandaros ir pernašos procesų sudėtingumą, sudaryti sistemos adekvatų skaitinį modelį, atkuriantį gamtines sąlygas, yra sudėtingas uždavinys.

Šiame darbe buvo panaudota ir detaliau išnagrinėta kompiuterinė programa HYDRUS, kuri leidžia analizuoti gruntų bei pasirinktų inžinerinių medžiagų savybes, jų kaitą, veikiant krituliams, drėgmės išgaravimui, augalų dangai bei daugeliui kitų hidrologinių procesų. Taip pat su jos pagalba galima

įvertinti drėgmės bei priemaišų migraciją, esant skirtingo išotinio ar pilnai vandeniui prisotintiems gruntams. Pagrindinės lygtys HYDRUS programoje yra sprendžiamos Galerkin'o baigtinių elementų metodu (Šimunek et al., 2008). Šis metodas yra naudojamas kaip alternatyva baigtinių skirtumų metodui, ypač susiduriant su modelio ribų nepastovumu, poringos terpės heterogeniškumu ar anizotropiškumu. Tačiau baigtinių elementų metodas turi trūkumų: skaičiavimų svyravimai, nepastovumas ir ilgesnis skaičiavimo laikas. Aproximuojama tinklelio, kuris dažniausiai yra taisyklingas trikampis ar stačiakampis mazguose. Kituose taškuose (ne mazguose) kintamas dydis nėra apibrėžtas. Baigtinių elementų metode objektas yra suskirstytas į elementus. Tai gali būti linijos atkarpa (vienmatės problemos), trikampis ar stačiakampis (dvimatės problemos) ir tetraedras (trimatės problemos). Vertės gaunamos, naudojant interpoliacines funkcijas, tai yra svarbiausios baigtinių skirtumų ir baigtinių elementų metodų skirtumai.

Baigtinių elementų metodo ypatumai (Wang, Anderson, 1995):

- fizikinė sistema padalinama į tam tikrą skaičių tarpusavyje mazgais susijusių baigtinių elementų; kiekvienas elementas apibūdinamas elemento numeriu ir mazgus elementų ribose jungiančiomis linijomis;
- elemento matrica sudaroma taip, kad susietų kiekvieno elemento kintamąjį kiekviename mazge;
- elemento matricos sukombinuojamos taip, kad suformuotų algebrinių lygčių eilę, kuri apibūdina visą plotą; šių algebrinių lygčių sistemos matrica yra vadinama globaline matrica;
- ribinės sąlygos yra įtrauktos į globalinės matricos lygtį;
- lygčių sistema sprendžiama Gauso metodu.



2 pav. Erdvės diskretizavimas baigtinių elementų metodu vienmatėms (a), dvimatėms (b) ir trimatėms (c) vandens judėjimo problemoms spręsti (Mallants, 2006).

Aeracijos zonos gruntuose drėgmės srautas yra kaitus laike ir erdvėje ir priklauso nuo drėgnio ir įsiurbiamojo slėgio. Sezoniškai keičiantis meteorologinėms sąlygoms, formuojančioms kritulius, išgaravimą ir nuotėkį, vandens srautas grunte arti žemės paviršiaus keičiasi laike ir erdvėje. Kaitus vandens srautas aeracijos zonoje q formuoja grunto drėgnį θ ir įsiurbiamąjį slėgį h . Hidraulinis laidis aeracijos zonoje priklauso nuo grunto drėgnio, todėl nusakant vandens srautą neišotintose sąlygose, spūdzio gradientas išreiškiamas įsiurbiamuoju slėgiu, taikant lygtį (1.6) (Sposito, 1986).

Vandens judėjimą aeracijos zonoje galima apibūdinti grunto hidraulinėmis funkcijomis, aprašančiomis grunto drėgmės ir hidraulinio laidumo priklausomybę nuo įsiurbiamojo slėgio. Šios priklausomybės remiasi van Genuchteno modeliu (van Genuchten, 1980) ir parametrais, kurie hidraulinio laidumo funkcijai išvedami iš statistinio grunto porų dydžio pasiskirstymo Mualemo modelio (Mualem, 1976). Yra įvairių modelių grunto drėgmės apibūdinimui, tačiau plačiausiai naudojamas van Genuchteno modelis (1980). Šie modeliai išreiškiami žemiau pateiktomis lygtimis.

Brooks ir Corey (1964):

$$S_e = \begin{cases} |\alpha h|^{-n}, & h < -1/\alpha \\ 1, & h \geq -1/\alpha \end{cases}, \quad (1.7)$$

van Genuchten (1980):

$$S_e = \frac{1}{(1 + |\alpha h|^n)^{1-1/n}}, \quad (1.8)$$

Kosugi (1996):

$$S_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{\ln(h/h_0)}{\sqrt{2}\sigma} \right\}, \quad (1.9)$$

čia h – įsiurbiamasis slėgis (m), α , n , σ – empiriniai parametrai (1/m), (-), (-), van Genuchteno konstantos, nuo kurių priklauso hidraulinių funkcijų forma.

Grunto soties vandeniui laipsnis apibūdinamas šia formule:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_s}{\theta_s - \theta_r}, \quad (1.10)$$

čia θ – grunto drėgnis tam tikru momentu (-); θ_s – soties drėgnis (-); θ_r – liekaninis drėgnis (-).

Hidraulinio laidžio funkcijos neįsotintoje zonoje išreiškiamos žemiau pateiktomis lygtimis.

$$\text{Books and Corey (1964): } K(h) = K_s S_e^{2/n+l+2}, \quad (1.11)$$

$$\text{van Genuchten (1980), Mualem (1976): } K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2, \quad (1.12)$$

Kosugi (1996), Mualem (1976):

$$K(h) = K_s S_e^l \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln(h/h_0)}{\sqrt{2}\sigma} + \frac{\sigma}{\sqrt{2}} \right] \right\}^2. \quad (1.13)$$

Van Genuchteno lygtis grunto drėgniui nustatyti (van Genuchten, 1980):

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha|h|)^n)^m}, & h < 0 \\ \theta_s, & h \geq 0 \end{cases}, \quad (1.14)$$

čia θ – grunto drėgnis tam tikru momentu (-); θ_r – liekaninis drėgnis (-); θ_s – soties drėgnis (-); α (1/m), n (-), m (-), σ (m), l (-) – empiriniai parametrai.

L. Richards'as (1931) pirmasis pritaikė Darsi dėsnį aeracijos zonai ir pasiūlė lygtį drėgmės migracijos aeracijos zonoje aprašymui:

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) \right] - S(h), \quad (1.15)$$

čia h – įsiurbiamasis slėgis (m); θ – grunto drėgnis (-); t – laikas (para); z – erdvinė koordinatė (m); K – hidraulinis laidumas (m/para); S – drėgmės pasisavinimas šaknimis (1/para).

1.8. Aeracijos zonos modelių panaudojimas saugos analizėje

Siekiant užtikrinti ilgalaikę mažo aktyvumo radioaktyviųjų atliekų saugą Nevadoje, Levitt ir kiti (1999) pasiūlė aplinkos charakterizavimo modeliavimo ir kontroliavimo strategiją tam, kad būtų įvertinta aeracijos zonos drėgmės migracija radioaktyviųjų atliekų laidojimo aplinkoje. Skaitiniai srautų modeliavimai programomis UNSAT-H ir HYDRUS-2D buvo atlikti, remiantis lizimetrų duomenimis ir įvairiais kapinyno dangos projektavimo parametrais, įskaitant dangos storį bei augmeniją. Modeliavimo rezultatai parodė, kad laikinoji danga (sutankintas 2,4 m storio aliuvio sluoksnis be augalijos) tinkamai izoluoja atliekas. Be to, ekperimentinių matavimų aeracijos zonoje duomenys ir drėgmės profilių modeliavimas suteikė galimybę parinkti kontrolės, priemones, priemonių pasirinkimo vietą, monitoringo atlikimo dažnumą ir monitoringo projektavimo tikslumą (Levitt et al., 1999).

Svarbus radioaktyviųjų atliekų kapinyno saugos aspektas buvo Mont Terri Rock laboratorijoje atliktas ilgalaikės difuzijos aeracijos zonoje eksperimentas Juros kalnuose, Šveicarijoje, tiriant traserius ^3HOH $^{22}\text{Na}^+$, Cs^+ , Cl^- ir I^- vienerių metų laikotarpyje, buvo nustatytas katjonų difuzijos koeficientas $(4-5) \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ir žymiai mažesnis anijonų (Cl^- ir I^-) $(0,7-1,6) \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$. Gauti rezultatai parodė molingo paviršiaus neigiamo krūvio įtaką anijonams. Dvimatės difuzijos skaičiavimai atlikti, naudojant aeracijos zonos transporto modelius (GIMRT ir HYDRUS-2D). Modeliais buvo siekta patikrinti stebimų traserių pernašos parametrus *in situ* bandymų metu, palyginti išmatuotus pernašos ir sorbcijos parametrus *in situ* su laboratorinių bandymų metu gautais eksperimentiniais rezultatais. Modeliavimo rezultatai parodė, kad ^3HOH ir I^- difuzija vyksta be sulaikymo (Wersina et al., 2004).

Siekiant geriau suvokti sąryšius ir dinamiką tarp įvairių kapinyno saugos komponentų ir valdymo sprendimų paviršinio kapinyno inžinerinių barjerų funkcionalumui pagrįsti, darbe (Piet et al., 2003) buvo aprašyta konceptualus modelis, modelio elementai ir modeliavimo priemonės. Buvo pasiūlyti konceptualūs modeliai aeracijos zonoje kiekvienam procesui, kurie galėtų įtakoti barjerų funkcionavimą. Modeliavimas buvo skirtas išaiškinti sudėtingus ryšius tarp įvairių komponentų, barjerų sistemos ir nustatyti jų valdymo strategiją. Darbe taip pat atliktas trimačio aeracijos zonos drėgmės srauto ir sudėtingų paviršių ribinių sąlygų trimatis modeliavimas, parodantis, kad priklausomai nuo rizikos ir valdymo veiksnių, barjerų funkcionavimo trukmė gali būti 30–1000 metų. Saugos vertinime barjerų struktūra buvo laikoma nekintanti tam tikrame apibrėžtame laiko intervale. Tuo tarpu aplinkos sąlygos (krituliai ir temperatūra) buvo kintančios. Kiti svarbiausi barjerų sistemos elementai taip pat buvo laikomi pastoviais (pvz., gaisro valdymo strategija, drėkinimo sistema, augalija, paviršiaus ekosistema (augalų transpiracija), medžiagų savybės, paviršiaus erozija ir t.t.) (Piet et al., 2003).

JAV, Nevadoje, radioaktyviųjų atliekų kapinyno aikštelėje (Albright et al., 1997) naudojant HYDRUS-2D kompiuterinę programą, buvo modeliuotas grunto drėgmės judėjimas, įskaitant ir inžinerinius barjerus. Panaudoti pradiniai duomenys: grunto drėgnio kaita su gyliu, paros krituliai, garavimas, transpiracija ir augalų šaknų paskirstymo ypatumai. Modelio rezultatai buvo palyginti vietovėse su augalija ir be augalijos. HYDRUS-2D gauti grunto drėgnio ir hidrostatinio slėgio pasiskirstymai iki 2 m gylio, kurie gerai atitiko lauko tyrimų duomenis. Pasitaikantys neatitikimai tarp lauko duomenų verčių ir prognozuojamų verčių galėtų daugeliu atveju būti sąlygojami su augalų danga susijusių parametrų neapibrėžtumais (šaknų paskirstymo ir transpiracijos greičio) (Albright et al., 1997).

Neretai yra tiriami ir modeliuojami gamtinių radionuklidų pernašos reiškiniai (Jacques et al., 2005). Šiame darbe modeliuota urano migracija iš žemės ūkio laukų į požeminį vandenį, o gauti rezultatai palyginti su urano pernašos srautu iš mažo aktyvumo radioaktyviųjų atliekų saugyklos. Daugelis

mineralinių trąšų, ypač superfosfatai, turi nedidelius kiekius ^{238}U ir ^{230}Th . Fosforo trąšomis tręšiamas dirvožemis kaupia uraną, torį ir jų dukterinius nuklidus, kurie galų gale gali pasiekti gruntinį vandenį. Abiejų šaltinių palyginimui buvo panaudotas pernašos modeliavimo programa HP1, kuri atsižvelgia į sąveiką tarp U ir organinės medžiagos, fosforo ir karbonatų. Visų geocheminių procesų modelis buvo sujungtas su drėgmės pernašos modeliu HYDRUS į bendrą modelį. Tai leido kartu su geocheminiais procesais modeliuoti drėgmės dinamikos pokyčius grunte, drėgmės imlumą ir srautą. Palyginus U migraciją iš žemės ūkio laukų ir iš radioaktyviųjų atliekų saugyklos, degradavus inžineriniams barjerams, paaiškėjo, kad ilgalaikis trąšų naudojimas gali sukelti net didesnę radiologinį poveikį sveikatai nei dėl mažo aktyvumo branduolinių atliekų saugyklos degradavusių barjerų (Jacques et al., 2005).

Darbe (Yim, Simonson, 2000) apibendrinti JAV žemo aktyvumo radioaktyviųjų atliekų kapinynų saugos analizės modeliai. Visi modeliai buvo suklasifikuoti į 3 kategorijas. Pirma kategorija – tai paviršinių procesų modeliai, kurie apima kapinyno degradaciją, atliekų evoliuciją ir radionuklidų patekimą (srautą) į gruntą. Antra modelių grupė nagrinėja radionuklidų migraciją iš aplinkinio grunto iki žmonių naudojamų vietovių. Šitie du modeliai traktuojami kaip radionuklidų transporto modeliai. Trečia modelių grupė yra poveikio arba dozės modeliai, kurie įvertina radionuklidų migracijos vaidmenį jonizuojančiosios spinduliuotės dozėje. Vandens infiltracija vertinama kaip dalis transporto uždavinio, kuris apima drėgmės judėjimą, priklausomai nuo gamtinių procesų ir inžinerinių barjerų funkcionavimo. Ši uždavinio dalis realizuojama aeracijos zonos modeliu, apimančiu nedegraduotus arba iš dalies ar visiškai degraduotus inžinerinius barjerus (Yim, Simonson, 2000).

Kaip potenciali vieta aukšto aktyvumo radioaktyviųjų atliekų laidojimui, JAV Energetikos ministerijos daugelį metų buvo tyrinėjama Jukos kalno (Yucca Mountain) vietovė Nevadoje. Viena iš pagrindinių šio pasirinkimo priežasčių buvo stora aeracijos zona, kur būtų talpinamos atliekos.

Su aeracijos zona susijusi sistema tyrinėta daugelyje mokslinių publikacijų (Flint et al., 2001; Bandurraga, Bodvarsson, 1999; Bodvarsson et al., 1999). Aeracijos zona buvo detalai tirta infiltracijos procesų charakterizavimui ir aeracijos zonos konceptualaus modelio sudarymui. Siekiant patikimai pagrįsti aeracijos zonos gebą sulaikyti radionuklidų migraciją, didelis dėmesys skirtas aeracijos zonos vandens judėjimo charakteristikoms, radionuklidų pernašos aeracijos zonoje cheminių ir fizikinių savybių charakterizavimui bei aeracijos zonos hidrogeologinių savybių nustatymui.

Vykdamas Ignalinos AE uždarymo projektus ir radioaktyviųjų atliekų laidojimo saugos analize Lietuvoje neseniai buvo atlikti aeracijos zonos procesų modeliavimo darbai (Jakimavičiūtė-Masalienė et al., 2008). Nagrinėjant preliminarios kapinyno saugos klausimus, buvo sumodeliuota aeracijos zonos drėgmės pernaša atsižvelgiant į gamtinius aikštelės grunto sluoksnius ir numatomus inžinerinius barjerus. Drėgmės srauto modeliavimas aeracijos zonoje buvo atliktas baigtinių skirtumų metodų programa HYDRUS-1D. Išnagrinėti aeracijos zonos procesų ypatumai, detaliau apibūdinant vertikaliame profilyje išsiurbiamojo slėgio ir drėgnio kaitą nuo kapinyno iki gruntinio vandens lygio.

Apžvalgoje buvo aptartos radioaktyviųjų atliekų problemos ir jų sprendimo principai. Išnagrinėti radionuklidų pernašos procesai kapinyno sistemoje ir drėgmės pernašos principai aeracijos zonoje, matematinio modeliavimo priemonės, leidžiančios prognozuoti vandens ir jose esančių priemaišų pernašą. Apžvelgta izotopinių tyrimų metodų taikymas aeracijos zonoje ir kitose vandens sistemose. Pateikti pavyzdžiai aeracijos zonos modelių panaudojimo saugos analizėje.

2. Metodinė dalis

2.1. Tyrimų objektai

Aeracijos zonos tyrimai buvo atlikti dvejose geologiniu bei hidrogeologiniu požiūriu skirtingose vietovėse, su kuriomis susiję skirtingi branduoliniai objektai – Maišiagalos radioaktyviųjų atliekų saugykla (nebeeksploatuojama) ir Stabatiškės aikštelė (3 pav.), kurioje yra numatyta įrengti trumpaamžių žemo ir vidutinio aktyvumo radioaktyviųjų atliekų kapinyną.



3 pav. Tyrimų objektų geografinė padėtis.

Lietuvoje medicinoje, pramonėje ir moksliniuose tyrimuose susidarančios mažo ir vidutinio aktyvumo radioaktyviosios atliekos buvo laikomos Maišiagalos radioaktyviųjų atliekų saugykloje (Maišiagalos saugykla), o vėliau jos buvo pradėtos talpinti IAE teritorijoje esančiose antžeminėse gelžbetoninėse saugyklose. Maišiagalos saugykla buvo įrengta 1963 metais, 7 km atstumu į šiaurės vakarus nuo Maišiagalos miestelio, apie 40 km atstumu nuo Vilniaus. Radioaktyviosios atliekos buvo talpinamos 3 m gylio monolitiniame gelžbetonio rūsyje ir užpilamos skystu betonu. Į saugyklą

taip pat buvo vežamos atliekos iš Kaliningrado srities Rusijoje bei Gardino srities Baltarusijoje. Atliekos čia buvo talpinamos iki 1989 metų. Dabartinė Maišiagalos saugykla – tai 2006 metais modernizuota RADON tipo saugykla (Grigaliūnienė, 2001). Tam, kad atliekos būtų patikimai izoliuotos nuo vandens, buvo įrengtas papildomas apsauginis barjeras – dviejų vandeniui nelaidžių membranų sistema bei apsauginis grunto sluoksnis (<http://www.rata.lt/lt.php/maisiagala>).

Maišiagalos saugykla yra Baltijos artezinio baseino rytinėje dalyje (Juodkazis, 1979). Viršutinę dalį iki 100 – 120 m gylio Maišiagalos aikštelės aplinkoje sudaro kvartero daugiausia ledyninės kilmės nuogulos. Virš ledyninių nuogulų slūgso nedidelio storio (iki 10 m) vėjo supustyto smulkiagrūdžio smėlio sluoksnis, aplinkoje pasitaiko durpės. Saugykla yra įrengta kopų arealo rytinėje dalyje. Čia vyrauja smėliniai gruntai, už 3 km yra nenuotakūs pelkiniai ežerėliai, tai lemia aplinkos mikroklimato ypatumus. Lietuvos klimato žinytų duomenimis, vidutinis metinis kritulių kiekis saugyklos aplinkoje gali būti 625 – 720 mm, o garavimas siekia apie 470 mm. Pastovi sniego danga saugyklos aplinkoje paprastai susidaro gruodžio trečiojo dešimtadienio pradžioje ir trunka iki kovo vidurio.

Trumpaamžėms mažo ir vidutinio aktyvumo radioaktyviosioms atliekoms, sukauptoms eksploatuojant IAE ir susidarysiančioms ją išmontuojant, prireiks apie 100 tūkst.m³ tūrio talpyklos. Išnagrinėjus Lietuvos teritorijos geologinės sąlygos IAE regionas įvertintas kaip labiausiai tinkamas kapinyno įrengimui. Įrengti paviršinį kapinyną mažai ir vidutiniškai radioaktyviosioms trumpaamžėms atliekoms iš IAE buvo nuspręsta Stabatiškėje, šalia atominės elektrinės (AE). Stabatiškės aikštelė yra IAE teritorijoje, rytinėje Visagino seniūnijos dalyje, apie 1 km į pietryčius nuo IAE ir 7 km į rytus nuo Visagino. Aikštelė yra 2 km nuo Drūkšių ežero, apie 4 km atstumu nuo valstybinės sienos Lietuva – Baltarusija. Iki valstybinės sienos su Latvija apie 9 km.

Hidrogeologiniu požiūriu tyrimų teritorija yra Baltijos artezinio baseino rytinėje dalyje – mitybos srityje (Juodkazis, 1979). Kvartero nuogulų storis

IAE rajone kinta nuo 62 iki 260 m. Kalvotą paviršių sudaro moreniniai molingi dariniai, o gausybė ežerų dubumų – užpelkėję (Marcinkevičius ir kt., 1995). Gruntinis vandeningasis sluoksnis yra paplitęs visoje teritorijoje, jį sudaro paskutiniojo apledėjimo ledyninės ir ledyno tirpsmo vandenu (vėlyvojo pleistoceno amžiaus) suklotos nuogulos bei dabartinių egzogeninių procesų (holoceno amžiaus) suklotos nuosėdos. Tai dūlėjimo paveiktas moreninis priemolis ar priesmėlis, aleuritas, įvairaus rupumo smėlis, žvirgždas, gargždas bei durpė. Šis vandeningasis sluoksnis yra maitinamas atmosferos kritulių drėgmės per aukščiau slūgsančias neprisotintas vandeniu paviršines nuogulas (Ignalinos..., 2006).

Pagal stebėjimo duomenis artimiausioje Dūkšto meteorologinėje stotyje vidutinis metinis kritulių kiekis laikotarpiu nuo 1972 iki 2010 m. sudaro apie 610 mm (Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos duomenimis) (Report..., 2011). Vidutinė metinė vertė per visą stebėjimo periodą (nuo 1987 iki 2009 m.) yra 659,6 mm.

2.2. Tyrimų metodai

Eksperimentinių tyrimų ir stebėjimų uždaviniai

Drėgmės ir priemaišų pernašos aeracijos zonoje modeliniam vertinimui reikalingos grunto hidraulines funkcijos: įsiurbiamojo slėgio priklausomybė nuo grunto drėgno, hidraulinio laidumo priklausomybės nuo įsiurbiamojo slėgio ir nuo grunto drėgno. Siekiant nustatyti tiriamų objektų grunto hidraulines funkcijas, būtina atlikti tyrimus eksperimentiniuose profiliuose. Tyrimai buvo atlikti skirtinguose hidrogeologiniu požiūriu Lietuvos regionuose: Maišiagalos saugyklos teritorijoje, kur vyrauja homogeniškas smėlinis gruntas ir Stabatiškės aikštelėje, kur aeracijos zonos profilis yra heterogeniškas ir sudarytas iš įvairių smėlinių ir molinių gruntų. Pagrindiniai eksperimentinių tyrimų ir stebėjimų uždaviniai:

- aeracijos zonos nesuardytos ir suardytos sandaros ėminių paėmimas;

- grunto fizikinių savybių, hidraulinio laidžio (filtracijos koeficiento), granulometrinės sudėties nustatymas ir drėgmės iš grunto bandinių išgavimas izotopiniams tyrimams (dažniausiai keli mililitrai);
- pjezometro gruntinio vandens lygio stebėjimams įrengimas Maišiagalos aikštelėje;
- gruntinio vandens ėminių paėmimas izotopiniams tyrimams (tričio (^3H)) savitojo aktyvumo nustatymui su praturtinimu, 600 ml) ir stabilųjų izotopų santykių (deguonies-18, $\delta^{18}\text{O}$, ir deuterio, $\delta^2\text{H}$, 100 ml) nustatymui 1 kartą per mėnesį;
- mėnesio kritulių izotopiniai tyrimai (Vilniaus ir Zarasų apylinkės).

Ėminių eksperimentiniams tyrimams paėmimas

Detaliems tyrimams per visą aeracijos zonos pjūvį buvo paimti nesuardytos ir suardytos sandaros grunto ėminiai. Nesuardytos sandaros ėminių paėmimui buvo naudojamas rankinis Olandijos kompanijos rankinis Eijkelkamp gražtas (4 pav.).



4 pav. Darbe panaudota nesuardytos sandaros grunto ėminių paėmimo įranga (nuotrauka iš <http://www.surechem.com.my/download/eijkelkamp/P1/P1-30e.pdf>).

Gražtas sudarytas iš sukimo rankenos, kurios apatinėje dalyje prisukamas 20 cm tuščiaviduris antgalis, jis yra įspaudžiamas į gruntą iki norimo gylio intervalo. Ištraukus, metalinis vamzdis su ėminiu uždengiamas specialiais dangteliais, užsandarinamas vakuomo plėvele ir toliau ėminys naudojamas tyrimuose.

2.2.1. Fizikinių-mechaninių grunto savybių ir filtracijos koeficiento nustatymas

Gamtinio drėgno nustatymui buvo naudojamas svorio metodas, nustatant grunte esančio vandens masės ir 100 – 105°C temperatūroje išdžiovinto (iki pastovios masės) grunto masės santykį. Vandens (išgaravusio džiovinant) masė randama, iš drėgnojo grunto masės atėmus sausojo (išdžiovinto) grunto masę.

$$W = \frac{m - m_s}{m_s} \cdot 100\% , \quad (2.1)$$

čia W – natūralus grunto drėgnis (%); m_s – sausojo (išdžiovinto) grunto masė (g); m – drėgnojo grunto masė (g).

Gamtinis grunto tankis priklauso nuo grunto mineralinės sudėties, poringumo ir drėgno. Kuo didesnis grunto drėgnis, tuo didesnis jo tankis. Grunto tankis gali kisti didesniame intervale. Jis apibūdina grunto fizinę būseną, sutankinimo laipsnį. Kuo labiau sutankintas gruntas, tuo mažiau jo tankis skiriasi nuo dalelių tankio.

Gamtinis grunto tankis išreiškiamas:

$$\rho = \frac{m}{V} , \quad (2.2)$$

čia ρ – gamtinis tankis (g/cm^3); m – grunto masė (g); V – tūris (cm^3).

Sauso grunto tankis skaitine verte yra lygus grunto tūrio masės vienetui, išskaičiuavus vandens masę porose (esant gamtiniam grunto poringumui). Grunto skeleto tankis (sauso grunto tankis) skaičiuojamas pagal formulę:

$$\rho_{sk} = \frac{\rho}{1 + 0,01 \cdot W}, \quad (2.3)$$

čia ρ – gamtinis tankis (g/cm^3); W – gamtinis drėgnis (%).

Poringumo skaičiavimo formulė:

$$n = \left(1 - \frac{\rho_{sk}}{\rho_s}\right) \cdot 100\%, \quad (2.4)$$

čia ρ_{sk} – sausos grunto tankis (g/cm^3); ρ_s – kietų dalelių tankis (g/cm^3).

Poringumo koeficiento skaičiavimo formulė:

$$e = \left(\frac{\rho_s - \rho_{sk}}{\rho_{sk}}\right), \quad (2.5)$$

čia ρ_s – kietų dalelių tankis (g/cm^3); ρ_{sk} – sausos grunto tankis (g/cm^3).

Soties laipsnis išreiškiamas vieneto dalimis arba procentais ir buvo nustatomas pagal formulę:

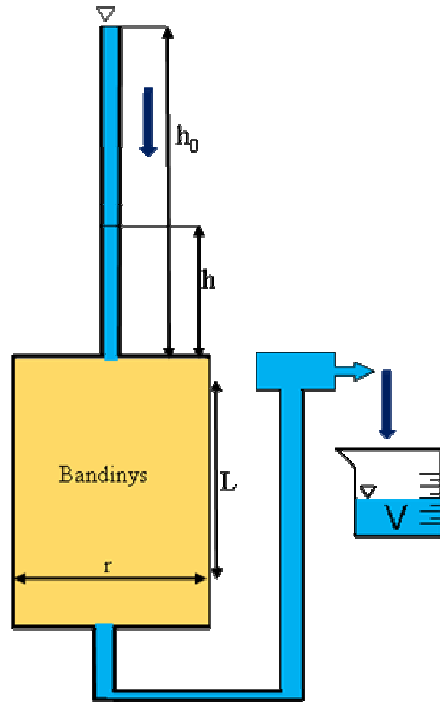
$$S_r = \frac{W \cdot \rho_s}{e}, \quad (2.6)$$

čia W – gamtinis drėgnis (vnt.d.); ρ_s – kietų dalelių tankis (g/cm^3); e – poringumo koeficientas (vnt.d).

Granulimetrinė gruntų sudėtis apibūdina gruntus pagal juos sudarančių dalelių dydį. Ji išreiškia procentinį grunto dalelių frakcijų kiekį. Vieną ar kitą gruntą sudarančių frakcijų dydis išreiškiamas milimetrais. Gruntų granulimetrinės sudėties analizės laboratoriniai tyrimai buvo atlikti Vilniaus universiteto (VU) laboratorijoje hidrometro metodu, VU ir Geologijos ir geografijos instituto laboratorijose sijojimo metodu. Granulimetrinės analizės rezultatai pateikiami lentelėse, grafikų pavidale (lentelė 4, 6, 7 pav., priedai 1–7), kur nurodomas procentinis visų išskirtų frakcijų kiekis.

Grunto hidraulinio laidumo laboratoriniai tyrimai buvo atliekami VU laboratorijoje žemėjančio spūdzio (*falling head method*) metodu, kai vanduo bandiniu teka vertikaliai laminarine srove. Šiuo metodu buvo nustatytos prisotinto grunto bandinių filtracijos koeficiento vertės. Darsio lygtyje esantis proporcingumo koeficientas vadinamas filtracijos koeficientu. Jis apibūdina uolienu laidumą vandeniui. Filtracijos koeficientą galime charakterizuoti, kaip per poringos aplinkos skerspjūvio plotą per laiko vienetą pratekantį vandens kiekį, esant gradientui lygiam 1.

Trumpai aptarsime filtracijos koeficiento nustatymo žemėjančio spūdzio metodu principinę schemą (5 pav.). Įrenginio pagrindinis komponentas – metalinis cilindras, į kurį talpinamas tiriamas gruntas. Bandinio viršutinėje ir apatinėje dalyse yra filtras tam, kad iš metalinio cilindro per angas filtracijos proceso metu kartu su vandeniu nebūtų išnešamas tiriamas gruntas. Įsotinus grunto bandinį iš apačios į viršų, filtracijos koeficientas nustatomas, esant žemėjančio spūdzio gradientui, leidžiant vandenį iš viršaus į apačią. Filtracijos proceso stebėjimui įrengtas stiklinis vamzdelis, kuris sujungtas su metaliniu cilindru lanksčia žarnele. Stebėjimo metu šis vamzdelis pripildytas vandeniu, kuris teka žemyn per grunto bandinį.



5 pav. Žemėjančio spūdzio metodo principinė schema.

Metalinio indo dugne įrengta anga, kuri sujungta su lanksčia žarnele. Tam, kad bandymo metu cilindre būtų pastovus lygis, bandinio pagrindas yra sujungtas su vandens rezervuaru. Laidumas nustatomas matuojant vandens tekėjimo greitį vandeniu prisotinto grunto bandinyje, esant tam tikram hidrauliniam gradientui. Grunto laidumas vandeniui (filtracijos koeficientas) išreiškiamas, kaip vandens filtracijos greitis grunte ir suskaičiuojamas pagal formulę:

$$K = \frac{v}{A \cdot i}, \quad (2.7)$$

čia v – filtracijos greitis (m/para); A – bandinio skerspjūvio plotas (m^2); i – hidraulinis gradientas (–).

Atsižvelgiant į vandens temperatūrą, buvo padaryta filtracijos koeficiento pataisa:

$$\tau = 0,7 + 0,03t, \quad (2.8)$$

čia τ – tiriamo grunto filtracijos koeficiento temperatūros pataisa; t – besifiltruojančio vandens temperatūra 10°C.

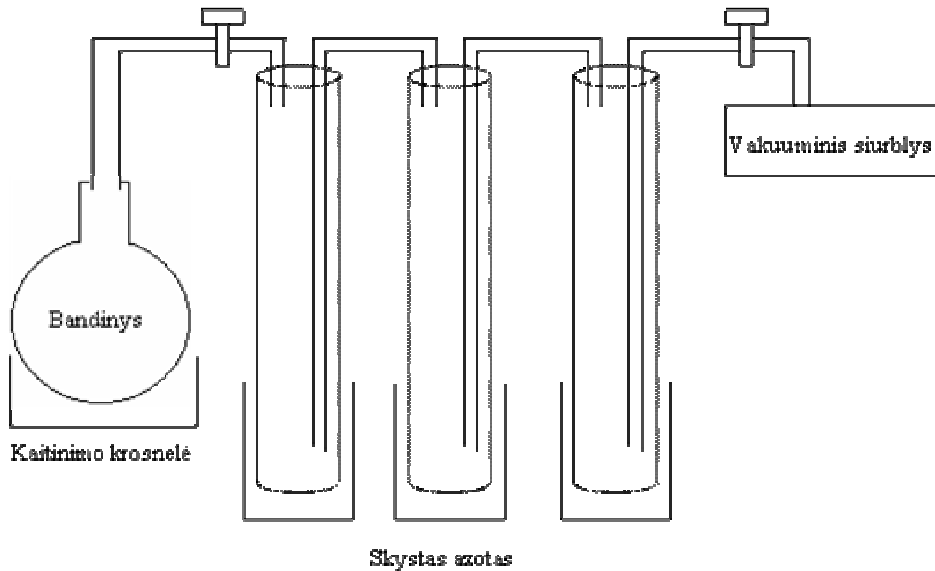
$$K_{10} = \frac{K}{\tau}, \quad (2.9)$$

čia K_{10} – filtracijos koeficientas, esant 10°C temperatūrai (m/para); K – su pataisa nustatyta grunto filtracijos koeficiento vertė (m/para); τ – tiriamo grunto filtracijos koeficiento temperatūros pataisa (-).

2.2.2. Grunto drėgmės išgavimas izotopiniams tyrimams

Siekiant išvengti izotopų frakcionavimo efektų mėginių paruošimo metu, grunto drėgmė išgaunama uždaroje sistemoje vakuuminio distiliavimo metodu (6 pav.).

Kad pakaktų vandens mėginiams tričio (nuo 2 iki 6 ml, geriausiu atveju – 8 ml) ir stabilųjų izotopų (apie 3 ml) analizei net ir esant mažam grunto gamtiniam drėgniui, drėgmės išskyrimui buvo imama apie 100 g grunto, kuris patalpinamas į kolbą ir prijungiamas prie vakuuminės distiliavimo sistemos. Mėginys palaipsniui kaitinamas 95°C temperatūroje. Drėgmė ledo pavidalu sukaupiama skystu azotu aušinamose gaudyklėse (Application..., 2009). Atšildžius ledą, gaunama nuo 2 ml (esant mažam gamtiniam drėgniui) iki 10–12 ml ir daugiau (esant dideliame gamtiniam drėgniui, artėjančiam prie grunto išotinio vandeniui ribos). Taip gaunamas chemiškai švarus vanduo, tinkamas ^3H savitojo aktyvumo ir stabilųjų izotopų santykio ($\delta^{18}\text{O}$ ir $\delta^2\text{H}$) nustatymui.



6 pav. Vakuuminio distiliavimo metodo schema.

2.2.3. Tričio savitojo aktyvumo krituliuose, aeracijos zonos drėgmėje ir gruntiniame vandenyje nustatymas

Tritis (^3H) yra trumpaamžis vandenilio izotopas, jo pusėjimo trukmė yra 12,32 metų (Lucas, Unterweger, 2000). ^3H koncentracija išreiškiama su radioaktyvumo vienetais susijusiais absoliučiais jo paplitimo vienetais – tričio vienetais (TV, angl., TU), todėl nėra reikalingas palyginamasis standartas. Vienas TV atitinka vieną ^3H atomą iš 10^{18} įprasto vandenilio atomų ^1H . Tričio vienetai susiję su radioaktyvumo vienetais (branduolių skilimo skaičiumi per sekundę):

$$1\text{TV} = \frac{1T}{10^{18}H} = 0,12\text{Bq/l} \text{ arba} \quad (2.10)$$

$$1\text{TV} = 0,118\text{ Bq/l} \text{ (1 Becquerel = 1 skilimas/s)} = 3,2 \cdot 10^{-12}\text{ Ci/l}; \quad (2.11)$$

(1 Ci yra 1 g ^{226}Ra radioaktyvumas; 1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq).

Gamtoje ^3H susidaro atmosferoje, vykstant kosminių spindulių branduolinėms reakcijoms su atmosferoje paplitusių cheminių elementų atomų branduoliais.



Panašiose branduolinėse reakcijose ^3H susidaro branduolinių sprogdinimų metu bei įvairios paskirties branduoliniuose reaktoriuose (Libby, 1946).

Skildamas ^3H skleidžia mažos energijos beta daleles ir pavirsta heliu-3:



Sistemingi ^3H stebėjimai krituliuose buvo pradėti jau branduolinėje epochoje, 1952 m. Kanadoje, Otavoje (Brown, 1961). R. Brown'as stebėjo apie du dešimtmečius išlikusį žymų ^3H aktyvumo koncentracijos krituliuose padidėjimą po pagrindinių termobranduolinių sprogdinimų atmosferoje. Iki termobranduolinių sprogdinimų foninė ^3H koncentracija krituliuose buvo apie 5–10 TV. Didžiausia ^3H koncentracija krituliuose buvo 1962–1963 metais ir siekė iki 6000 TV vasaros mėnesiais šiaurės pusrutulyje. Po branduolinių sprogdinimų moratoriumo nuo septintojo dešimtmečio pradžios ^3H koncentracija krituliuose eksponentiškai mažėjo ir šiuo metu dažniausiai neviršija 10 TV, maksimalios vertės būna pavasarį ir vasarą, minimalios – rudenį ir žiemą. Buvusi didelė ^3H koncentracija krituliuose septintoje dešimtmečio pradžioje leidžia datuoti gruntinį vandenį ir spūdinį tarpfluoksninį negiliai slūgsantį požeminį vandenį palyginus dideliame laiko intervale – nuo kelių iki 50–60 metų. Aplinkoje paplitęs ^3H yra patogus indikatorius, nustatant aktyviai sąveikaujančio su atmosfera vandens amžių, ypač šiauriniame

pusrutulyje. Pietiniame pusrutulyje ^3H koncentracija krituliuose visada buvo žymiai mažesnė. Šiuo metu požeminiame vandenyje ^3H koncentracija retai kada viršija 50 TV, dažniausiai kinta nuo <1 iki 10 TV.

Vakuuminės distiliacijos būdu iš grunto išgautos drėgmės mėginiuose ir gruntinio vandens bei kritulių vandens mėginiuose ^3H savitojo aktyvumo matavimai atlikti Radioizotopinių tyrimų laboratorijoje, naudojant skystų scintiliatorių spektrometrą TRI-CARB 3170TR/SL ir QUANTULUS 1220. Kadangi drėgmės vandens galima išgauti tik kelis ml, tai šiuo atveju ^3H savitasis aktyvumas buvo nustatytas tiesioginio matavimo (be praturtinimo) būdu, kurio neapibrėžtis gali siekti 2–4 TV. Kadangi mėnesio suminių kritulių ir vienkartinių mėnesinių gruntinio vandens ėminių tūris buvo 600 ml ir pakankamas atlikti mėginio praturtinimą ^3H , tai šiais atvejais ^3H savitasis aktyvumas buvo nustatytas matavimo su praturtinimu būdu, kurio neapibrėžtis gali siekti tik 0,1–0,2 TV.

Abiem atvejais iki 8 ml vandens buvo sumaišoma su scintiliaciniu tirpalu, kad gautųsi 20 ml bandinys, kuris, sužadintas ^3H skilimo metu susidarantių β^- dalelių, skleidžia fotonus – vyksta liuminescencija. Beta spektrometro fotodaugintuvai fotonus paverčia elektriniais impulsais, kuriuos kelias valandas ar paras registruoja prietaiso elektronika. Rezultatai suskaičiuojami, palyginus ^3H vandens standarto, foninio vandens ir tiriamo vandens mėginio impulsų kaupimo greitį.

2.2.4. Stabilių izotopų santykio ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ir $^2\text{H}/^1\text{H}$) ir tričio (^3H) pasiskirstymo krituliuose, aeracijos zonos drėgmėje ir gruntiniame vandenyje nustatymas

H. Craig'as 1961 m. (Craig, 1961a) vandens vandenilio ir deguonies izotopų santykių matavimų standartu pasiūlė SMOW (*Standard Mean Ocean Water*) – vidutinį pasaulinio vandenyno vandenį. Tai buvo hipotetinis NBS-1 standarto atžvilgiu sukalibruotas vanduo. NBS-1 buvo iš Potomac upės paimtas

vandens mėginys. Kadangi vandenynas yra hidrologinio ciklo pagrindas, todėl meteoriniams (su atmosfera susijusiems) vandenims ir buvo priimtas SMOW standartas. H. Craig'as SMOW standartą išreiškė taip:

$$\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)_{SMOW} = 1,008 \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)_{NBS-1} = (1993,4 \pm 2,5) \cdot 10^{-6}, \quad (2.15)$$

$$\left(\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}}\right)_{SMOW} = 1,050 \left(\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}}\right)_{NBS-1} = (158 \pm 2) \cdot 10^{-6}. \quad (2.16)$$

Vėliau TATENA iš distiliuoto jūros vandens paruošė standartą, kurio izotopinė sudėtis gana artima SMOW standartui. Vienos standartas buvo pavadintas VSMOW standartu.

Daugelis su atmosferos krituliais susijusių vandens objektų izotopiniu atžvilgiu yra daug lengvesni už vandenyno vandenį. Tokiems vandenims TATENA 1978 m. paruošė lengvo vandens standartą – *Standard Light Antarctic Precipitation*, arba SLAP. Jo izotopinė sudėtis tokia:

$$\delta^{18}\text{O} = -55,5 \text{ ‰ VSMOW}; \delta^2\text{H} = -428,0 \text{ ‰ VSMOW}. \quad (2.17)$$

GMVL pagal daugiamečių tyrimų rezultatus nustatė H. Craig'as 1961 metais (Craig, 1961 b):

$$\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10 \text{ ‰ VSMOW}. \quad (2.18)$$

Deguonies ir vandenilio izotopinė sudėtis yra nustatoma kaip sunkaus ir lengvo izotopų paplitimo santykis (R_{sample}), palygintas su VSMOW standartu (R_{std}). Pastarasis žymimas δ ir yra išreiškiamas promilėmis (‰):

$$\delta = (R_{sample} / R_{std} - 1) \cdot 1000 \text{ ‰}. \quad (2.19)$$

Šiame darbe vandens vandenilio ir deguonies stabiliųjų izotopų santykio matavimai atlikti Talino technologijos universitete, naudojant dujų šaltinio izotopų santykio masių spektrometrą (IRMS) DELTA V Advantage su automatine vandens bandinių paruošimo ir įvedimo sistema Thermo Fisher Scientific GasBench II (Nelson, 2000). Vandens bandinys vienkartinė pipete patalpinamas į 10 ml indelį su perduriamu dangteliu, matuojant $\delta^2\text{H}$ pridedamas dar platinos katalizatorius. Automatinė sistema prapučia indelį su vandens bandiniu H_2 ar CO_2 dujų mišiniu su heliu. Pastarosios dujos mišinyje su helio dujomis naudojamos kaip pusiausvyrinis dujų mišinys. Praėjus reikiamam laikui izotopų pusiausvyrai pasiekti ($\delta^2\text{H}$ atveju – 40 minučių, $\delta^{18}\text{O}$ atveju – 20 valandų), vandens bandinių serija analizuojama masių spektrometru (nustatant $\delta^2\text{H}$ ar $\delta^{18}\text{O}$), pasiekiant $\delta^{18}\text{O}$ ir $\delta^2\text{H}$ nustatymo neapibrėžtį atitinkamai 0,1‰ ir 1‰.

2.2.5. Aeracijos zonos modeliavimo principai, naudojant HYDRUS-1D

Tiriant aeracijos zonos procesus modeliavimo priemonėmis, sąryšis tarp vandens srauto q , grunto drėgnio θ ir įsiurbiamojo slėgio h turi atitikti masės tvermės dėsnį, išreiškiamą masės balanso arba srauto tolydumo lygtimi (Jury et al., 1991):

$$\frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial \theta}{\partial t} + r_w = 0, \quad (2.20)$$

čia r_w – aeracijos zonos vandens sunaudojimo per šaknis norma ($r_w=0$, kai nėra augalų šaknų).

Vandens srautą išreiškus Darsio-Buckingham'o srauto lygtimi ir priėmus $r_w=0$, gaunama masės balanso lygtis:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \left(\frac{\partial(h+x)}{\partial x} \right) \right] = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial x} + 1 \right) \right]. \quad (2.21)$$

Kadangi ši lygtis turi du nežinomus narius (θ ir h), tai tokioje formoje ji negali būti išspręsta. θ arba h pakeitimui naudojama grunto drėgmės charakteristika $\theta(h)$. Tada remiantis Richards'o lygtimi, drėgmės pernaša išreiškiama taip:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_w(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} + K(\theta) \right], \quad (2.22)$$

čia $D_w(\theta)$ yra vandens difuziškumas (*diffusivity*).

Kai $D_w(\theta)$ ir $K(\theta)$ yra žinomi, pastaroji lygtis gali būti išspręsta skaitiniais metodais, kai yra apibrėžtos viršutinė (grunto paviršius) ir apatinė (tam tikras grunto profilio gylis) ribinės sąlygos. Taip pat turi būti apibrėžtas pradinis vandens drėgnis momentu $t=0$.

Remiantis Richards'o lygtimi, įsiurbiamasis slėgis išreiškiamas šia formule (Jury et al., 1991):

$$C_w(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial x} + 1 \right) \right], \quad (2.23)$$

čia $C_w(h) = d\theta/dh$ vandens talpos funkcija.

Abi pastarosios diferencialinės lygtys gali būti išspręstos baigtinių skirtumų metodu, kuris pagrįstas dalinių išvestinių lygčių pakeitimu baigtinių skirtumų lygtimis.

Tiek analitiniams, tiek ir skaitiniams sprendiniams reikia pradinių ir ribinių sąlygų apibrėžimo. Pradinės sąlygos apibūdina kintamus dydžius (pvz., priemaišų koncentraciją) pradiniu laiko momentu $t=0$. Ribinės sąlygos

apibūdina nagrinėjamos poringos erdvės ir tos erdvės atžvilgiu išorinės aplinkos sąveiką. Modelio ribinės sąlygos parenkamos pagal hidrologinę ir hidrogeologinę informaciją taip, kad kiek įmanoma realiau atspindėtų tiriamo objekto situaciją.

Vandens spūdzio (Dirichlet tipo) ribinė sąlyga aprašoma lygtimi:

$$h(z,t)=h_0(z,t); z=0 \text{ (profilio apačia) ar } z=L \text{ (profilio viršus)}. \quad (2.24)$$

Gradiento ribinė sąlyga aprašoma lygtimi:

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 1; z=L. \quad (2.25)$$

Srauto (Neumann tipo) ribinė sąlyga aprašoma lygtimi:

$$-K\left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1\right) = q_0(z,t); z=0 \text{ ar } z=L, \quad (2.26)$$

čia h_0 (m), q_0 (m/s) yra tam tikras slėgis ir vienetinis debitas.

Atmosferos ribinė sąlyga aprašoma lygtimi:

$$\left| -K \frac{\partial h}{\partial x} - K \right| \leq E, \quad (2.27)$$

čia $h_A \leq h \leq h_S$, $x=L$, kur E didžiausia galima infiltracija ir garavimas (m/para), h_A ir h_S atitinkamai yra minimalus ir maksimalus slėgis (m). h_A vertė nustatoma pagal pusiausvyrą tarp dirvožemio vandens ir atmosferos vandens garų, h_S paprastai lygus nuliui.

Masės pernašai yra apibrėžtos trejopos ribinės sąlygos: užduota koncentracija (pirmos eilės ribinė sąlyga), užduotas gradientas (antros eilės ribinė sąlyga) ir kintamas srautas (trečios eilės ribinė sąlyga).

Žemiau pateikiamos masės pernešimo ribinių sąlygų formuluotės.

1-os eilės (Dirichlet) ribinė sąlyga aprašoma lygtimi:

$$c(x,z,t)=c_0(x,z,t); (x,z) \in \Gamma_D. \quad (2.28)$$

2-os eilės (Neumann) ribinė sąlyga aprašoma lygtimi:

$$\theta D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x} n_i = 0; (x,z) \in \Gamma_N. \quad (2.29)$$

3-os eilės (Cauchy) ribinė sąlyga aprašoma lygtimi:

$$-\theta D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} n_i + q_i n_i c = q_i n_i c_0; (x,z) \in \Gamma_C, \quad (2.30)$$

čia Γ_D – srauto domeno dalis, kuriai nustatytos Dirichlet tipo ribinės sąlygos; Γ_N – srauto domeno dalis, kuriai nustatytos Neumann tipo ribinės sąlygos; Γ_C – srauto domeno dalis, kuriai nustatytos Cauchy tipo ribinės sąlygos.

Vienmačio srauto difuzijos-dispersijos apibūdinimui naudojama formulė:

$$\theta D = \lambda |q| + \theta D_d, \quad (2.31)$$

čia D_d – joninės ar molekulinės difuzijos koeficientas laisvame vandenyje ($m^2/para$); λ – išilginis dispersiškumas (m); θ – tūrinis drėgnis (-); q – vienetinis debitas ($m/para$).

Vienmačio srauto konvekcijos-dispersijos lygtis su linijine adsorbcija:

$$s = K_d c, \quad R = 1 + \frac{\rho K_d}{\theta}, \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial R \theta_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} - q_i c \right) + \phi, \quad (2.33)$$

čia K_d – pasiskirstymo koeficientas (m^3/kg); R – sulėtinimo koeficientas (-); s – sorbuotos medžiagos koncentracija (-); c – vandenyje ištirpusios medžiagos koncentracija (kg/l); θ – drėgnis (-); D – dispersijos koeficientas ($m^2/para$); q – vienetinis debitas ($m/para$); ϕ – konstanta, nusakanti reakcijos greitį ($kg/m^3 para$).

Vienmačio srauto atvejui apibendrintai pradinės ir ribinės sąlygos yra apibūdinamos taip:

$$C(x,t) = f(t), \quad (2.34)$$

x – erdvinė koordinatė, t – laikas.

Būdinga pradinių sąlygų forma:

$$C(x,0) = 0, x \geq 0, \quad (2.35)$$

šiuo atveju laiko momentu $t=0$ koncentracija tėkmės srityje lygi nuliui.

Pirmos eilės ribinė sąlyga:

$$C(0,t) = C_0, t \geq 0. \quad (2.36)$$

Kai prasideda tėkmė, koncentracija C_0 pereis ribą $x=0$. Tai dažnai vadinama fiksuoto žingsnio funkcija.

Srities pabaigoje galima apibrėžti nulinės koncentracijos ribinę sąlygą (pirmos eilės ribinę sąlygą):

$$C(\infty,t) = C_0, t \geq 0. \quad (2.37)$$

čia, $x = \infty$ rodo, kad yra pusiau begalinė sritis ($0 \leq x < \infty$).

Antros eilės ribinę sąlygą (gradientas lygus nuliui):

$$\frac{\partial C}{\partial x}(\infty,t) = f(t) = 0. \quad (2.38)$$

Ši ribinė sąlyga yra tinkama, jei yra pakankamai didelis atstumas tarp įvesties ir išvesties paviršių.

Sprendžiant konkrečius uždavinius kompiuterinėmis programomis, pirmiausia aeracijos zonos grunto profilis yra padalinamas į $N-1$ skaičių elementų, pastarieji jungiami mazguose (N yra mazgų skaičius). Ta pati erdvinė diskretizavimo schema yra naudojama vandens srauto, priemaišų ir šilumos pernešimo apibūdinimui. Programoje HYDRUS priimama, kad koordinatė x yra nukreipta aukštyn.

Sprendžiant drėgmės srauto uždavinį, Richards'o lygties diskretizavimui naudojama standartinė sutelktos masės linijinė baigtinių elementų schema (Vogel, Cislerova, 1988):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S = \frac{\partial q}{\partial x} - S, \quad (2.39)$$

$$\frac{\theta_i^{j+1,k+1} - \theta_i^j}{\Delta t} = \frac{q_{i+1/2}^{j+1} - q_{i-1/2}^{j+1}}{\Delta x} - S_i^j, \quad (2.40)$$

$$q = -K \frac{\partial h}{\partial x} - K, \quad (2.41)$$

$$q_{i+1/2}^{j+1} = -K_{i+1/2}^{j+1} \frac{h_{i+1}^{j+1} - h_i^{j+1}}{\Delta x_i} - K_{i+1/2}^{j+1}, \quad (2.42)$$

$$\begin{aligned} \frac{\theta_i^{j+1,k+1} - \theta_i^j}{\Delta t} = & \frac{1}{\Delta x} \left(K_{i+1/2}^{j+1,k} \frac{h_{i+1}^{j+1,k+1} - h_i^{j+1,k+1}}{\Delta x_{i-1}} - K_{i-1/2}^{j+1,k} \frac{h_i^{j+1,k+1} - h_{i-1}^{j+1,k+1}}{\Delta x_{i-1}} \right) + \\ & + \frac{K_{i+1/2}^{j+1,k} - K_{i-1/2}^{j+1,k}}{\Delta x} \cos \alpha - S_i^j. \end{aligned} \quad (2.43)$$

Lygtis sprendžiama, naudojant Picard'o sprendimo schemą (Huang et al., 1996).

Sprendžiant masės pernašos uždavinį, naudojama ši lygtis:

$$\frac{\partial(\theta_c)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho s)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\theta D \frac{\partial c}{\partial z} - qc \right) - \phi, \quad (2.44)$$

čia c – priemaišų koncentracija vandenyje (kg/m^3); s – grunto dalelių adsorbuota koncentracija (-); θ – tūrinis drėgnis (-); ρ – grunto tankis (g/m^3); D – dispersijos koeficientas (m^2/para); q – vienetinis debitas (m/para); ϕ – konstanta ($\text{kg}/\text{m}^3 \text{para}$).

Lygtis sprendžiama Galerkin'o metodu (Neuman et al., 1993).

Pernašos lygties skaitiniams sprendiniams dažnai būdingos skaitinės osciliacijos ir (arba) pernelyg didelė skaitinė dispersija netoli ryškių priemaišų koncentracijos frontų. Tinklelio Peclet skaičius Pe^e , priklausomai nuo baigtinių

elementų tinklelio detalumo, apibūdina vyraujančią medžiagos pernašos mechanizmą:

$$Pe^e = \frac{q\Delta x}{\theta D}, \quad (2.45)$$

čia Δx yra baigtinių elementų ilgis.

Peclet skaičius didėja, kai palyginus su dispersine pernašos dalimi dominuoja konvekcinė pernaša. Kai Peclet skaičius neviršija 5, skaitinės osciliacijos nepasireiškia.

Kitas bedimensis dydis, kuris charakterizuoja santykinę skaitinių osciliacijų pasireiškimo mastą, yra su skaičiavimų laiko diskretizavimu susijęs Courant'o skaičius Cr^e :

$$Cr^e = \frac{q\Delta t}{\theta R\Delta x}. \quad (2.46)$$

Yra įvairių skaitinių osciliacijų eliminavimo būdų, taikant papildomą išilginę dispersiją, laiko žingsnio trumpinimą, siekiant, kad Courant'o skaičius būtų mažesnis už 1 arba lygus 1.

Lauko ir laboratoriniai tyrimai kartu su programine įranga – priemonės iškeltų problemų sprendimui. Šiame skyriuje pateikti darbe naudoti tyrimo metodai bei uždaviniai, aprašytos įsisavintos lauko darbų ir laboratorinių tyrimų metodikos bei išnagrinėti aeracijos zonos modeliavimo principai, naudojant HYDRUS-1D kompiuterine programa.

3. Rezultatai ir jų aptarimas

3.1. Eksperimentiniai tyrimai

3.1.1. Aeracijos zonos gruntų fizikinės-mechaninės savybės

Tirtų objektų gruntų apibūdinimui, jų fizikinių-mechaninių savybių nustatymui ir gruntų klasifikavimui buvo paimti nesuardytos bei suardytos sandaros mėginiai.

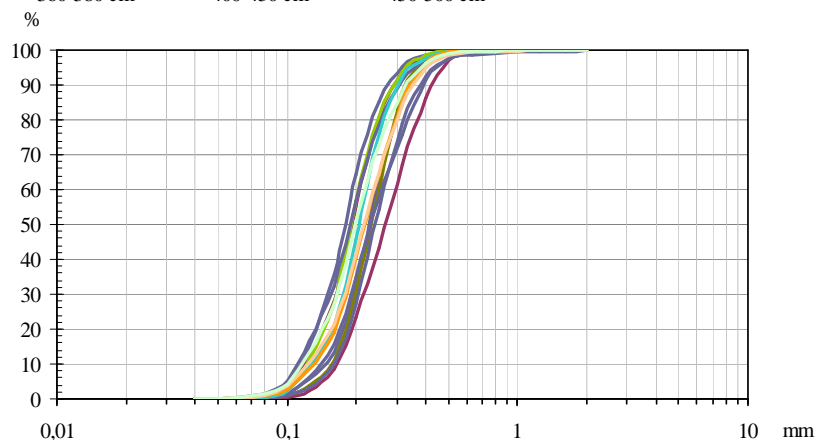
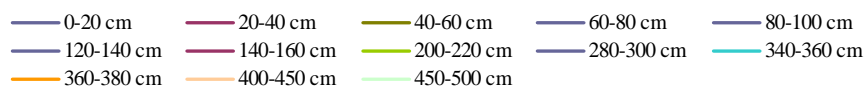
Maišiagalos saugyklos aikštelės aeracijos zonos profilis charakterizuotas grunto tankio ir drėgnio bei filtracijos koeficiento kaitos duomenimis. Nesuardytos sandaros grunto ėminiai buvo paimti iki 380 cm gylio kas 20 cm nuo žemės paviršiaus, nuo 380 cm iki 750 cm paimti suardytos sandaros ėminiai. Visais atvejais 20 cm ilgio grunto ėminys, nesuardant jo sandaros, buvo suskirstytas ir patalpintas į 3 vienodo tūrio ($45,30 \text{ cm}^3$) cilindro formos indelius. Vienas indelis su mėginiu buvo skirtas filtracijos koeficiento nustatymui, 2 indeliai – fizikinių-mechaninių parametrų nustatymui, likusi medžiaga (suardant jos sandarą) buvo skirta drėgmės išskyrimui izotopiniams tyrimams.

Maišiagalos saugyklos aikštelės aeracijos zonos profilio grunto granulimetrinės sudėties nustatymo sijojimo metodu duomenys pateikti 4 lentelėje ir 7 paveiksle.

4 lentelė. Maišiagalos saugyklos aikštelės aeracijos zonos grunto granulimetrinės sudėties (frakcijų dydžiai duoti milimetrais) tyrimų rezultatai.

Gylis, cm	Molis	Dulkis			Smėlis			Žvyras
		Smulkus	Vidutinis	Ropus	Smulkus	Vidutinis	Ropus	
	<0,002	0,002- 0,0063	0,0063- 0,02	0,02- 0,063	0,063-0,2	0,2-0,63	0,63-2	>2
0–20	0	0	0	0,29	62,23	37,39	0,09	0
20–40	0	0	0	0,15	43,42	56,18	0,25	0
40–60	0	0	0	0,16	54,19	40,43	0,02	0
60–80	0	0	0	0,16	54,19	44,63	0,94	0
80–100	0	0	0	0,30	57,41	41,78	0,51	0
120–140	0	0	0	0,71	84,61	14,60	0,08	0
140–160	0	0	0	0,59	79,75	19,45	0,21	0

Gylis, cm	Molis	Dulkis			Smėlis			Žvyras
		Smulkus	Vidutinis	Rupus	Smulkus	Vidutinis	Rupus	
	<0,002	0,002-0,0063	0,0063-0,02	0,02-0,063	0,063-0,2	0,2-0,63	0,63-2	>2
200–220	0	0	0	0,48	80,32	19,12	0,08	0
280–300	0	0	0	1,31	77,39	21,08	0,19	0
340–360	0	0	0	0,53	74,97	24,36	0,12	0
360–380	0	0	0	0,77	63,73	35,38	0,12	0
400–450	0	0	0	1,03	63,89	34,67	0,41	0
450–500	0	0	0	1,34	71,34	27,03	0,39	0



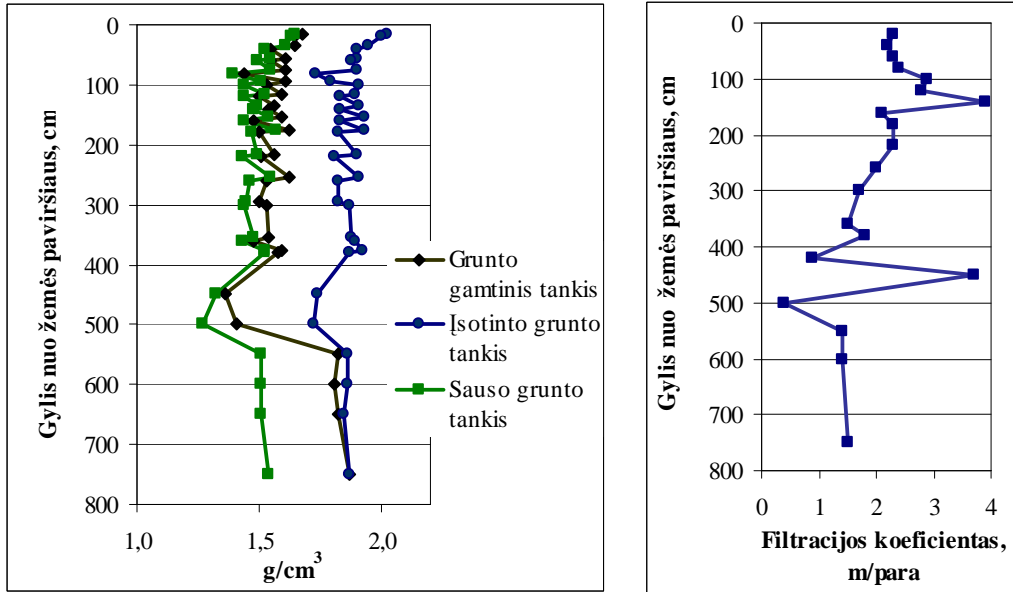
7 pav. Maišiagalos saugyklos aikštelės aeracijos zonos grunto granuliometrinės sudėties kreivės.

Maišiagalos saugyklos aikštelės aeracijos zonos grunto profilį sudaro vienodos sanklodos (sanklodos rodiklis C_c sudaro – 0,8, rūšiuotumo koeficientas C_u sudaro nuo 1,7–1,9) purus ir vidutinio tankumo (5 lentelė, 8 pav.) šviesiai rudas smėlis.

Nesuardytos sandaros sauso grunto tankis sudaro nuo 1,36 g/cm³ iki 1,65 g/cm³, grunto gamtinis tankis 1,44-1,68 g/cm³.

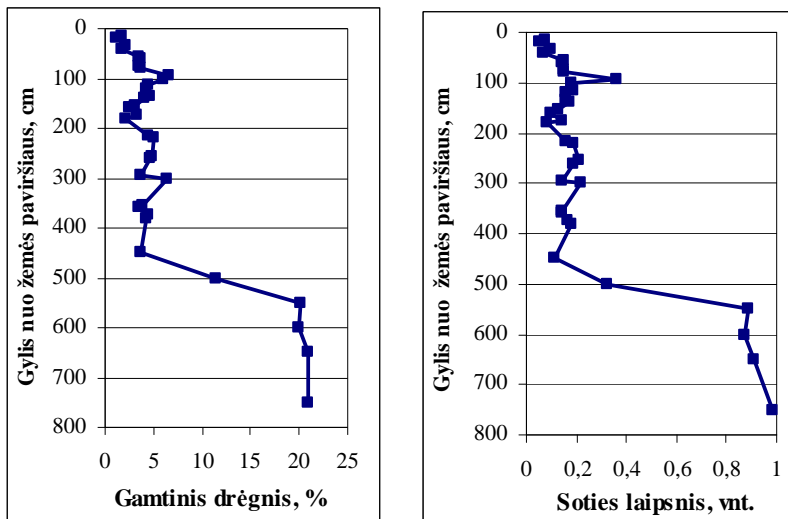
5 lentelė. Maišiagalos saugyklos aikštelės aeracijos zonos grunto fizikinių-
mechaninių savybių tyrimų rezultatai.

Gylis, cm	Grunto gamtinis drėgnis, (%)	Sauso grunto tankis, (g/cm ³)	Įsotinto grunto tankis, (g/cm ³)	Grunto gamtinis tankis, (g/cm ³)	Bendras poringumas, (vnt. d.)	Poringumo koeficientas, (vnt. d.)
10–15	1,71	1,65	2,02	1,68	0,38	0,61
15–20	1,24	1,63	2,00	1,65	0,39	0,64
30–35	2,10	1,61	1,95	1,65	0,39	0,65
35–40	1,77	1,52	1,90	1,55	0,43	0,75
50–55	3,43	1,55	1,90	1,61	0,42	0,71
55–60	3,74	1,49	1,88	1,55	0,44	0,78
70–75	3,43	1,55	1,90	1,61	0,42	0,71
75–80	3,68	1,39	1,73	1,44	0,48	0,91
90–95	6,66	1,51	1,79	1,61	0,43	0,76
95–100	5,98	1,44	1,91	1,53	0,46	0,85
110–115	4,46	1,52	1,89	1,59	0,43	0,74
115–120	4,30	1,44	1,83	1,50	0,46	0,84
130–135	4,57	1,49	1,91	1,56	0,44	0,79
135–140	4,08	1,48	1,83	1,54	0,45	0,80
150–155	3,16	1,54	1,93	1,59	0,42	0,72
155–160	2,55	1,44	1,83	1,48	0,46	0,84
170–175	3,23	1,57	1,93	1,62	0,41	0,69
175–180	2,05	1,47	1,82	1,50	0,45	0,81
210–215	4,40	1,49	1,90	1,56	0,44	0,78
215–220	5,07	1,43	1,81	1,51	0,46	0,86
250–255	4,86	1,55	1,91	1,62	0,42	0,72
255–260	4,56	1,46	1,82	1,53	0,45	0,82
290–295	3,69	1,45	1,82	1,50	0,46	0,83
295–300	6,39	1,44	1,87	1,53	0,46	0,85
350–355	3,89	1,48	1,88	1,54	0,44	0,80
355–360	3,47	1,43	1,89	1,48	0,46	0,86
370–375	4,39	1,52	1,92	1,59	0,43	0,75
375–380	4,19	1,52	1,87	1,58	0,43	0,75
Suardytos sandaros mėginiai						
400–450	3,66	1,32	1,74	1,36	0,51	1,02
450–500	11,37	1,27	1,72	1,41	0,52	1,10
500–550	20,13	1,51	1,86	1,82	0,43	0,76
550–600	19,97	1,51	1,86	1,81	0,35	0,53
600–650	20,97	1,51	1,85	1,82	0,35	0,53
700–750	21,01	1,54	1,87	1,87	0,33	0,49



8 pav. Maišiagalos saugyklos aikštelės aeracijos zonos grunto tankio ir filtracijos koeficiento kaita su gyliu.

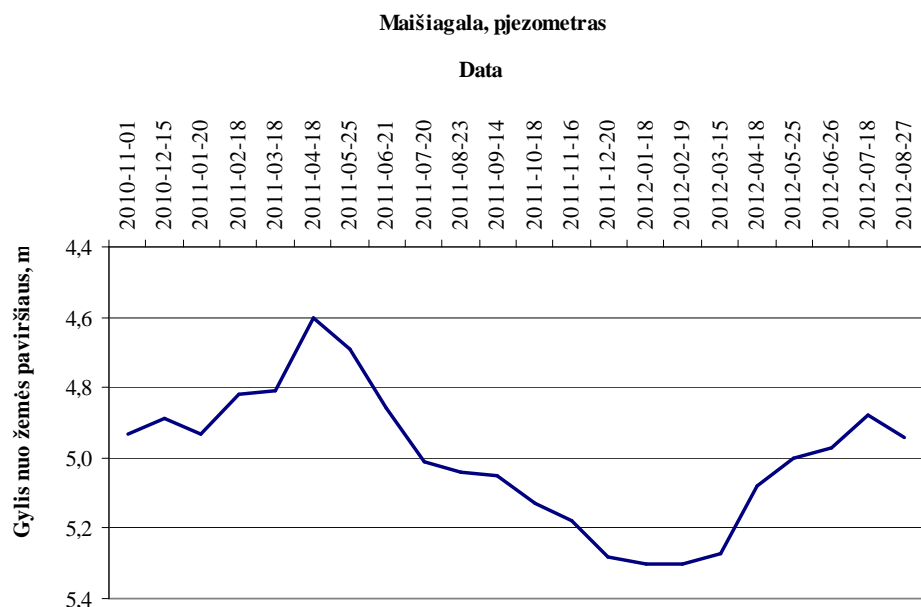
Grunto hidraulinis laidis visiško prisotinimo sąlygomis buvo nustatytas Vilniaus universiteto laboratorijoje pagal žemėjančio vandens spūdžio schemą, kai vanduo bandiniu teka laminarine srove. Filtracijos koeficiento vertės kinta nuo 0,9 iki 3,9 m/para (9 pav.).



9 pav. Maišiagalos saugyklos aikštelės aeracijos zonos grunto gamtinio drėgnio ir soties laipsnio kaita su gyliu.

Iki 4,5 m gylio nuo žemės paviršiaus gruntas yra orasausis, soties vandeniū laipsnis čia sudaro 0,1–0,2 vnt., gamtinis drėgnis svyruoja nuo 1 iki 7% (9 pav.). Nuo 4,5 m gylio grunto gamtinis drėgnis didėja, o didesniame nei 5 m gylyje gruntas yra prisotintas vandeniū.

Maišiagalos saugyklos aikštelės aeracijos zonos tyrimų sklype buvo įrengtas pjezometras gruntinio vandens lygio stebėjimui ir vandens ėminių paėmimui. Tyrimų sklype, o taip pat ir visoje Maišiagalos saugyklos teritorijoje gruntinis (pirmas nuo žemės paviršiaus) vanduo kaupiasi smulkiame smėlyje. Gruntinio vandens stebėjimai aeracijos zonos tyrimų sklype atliekami nuo 2010 metų spalio mėnesio. Vandens lygio matavimai buvo atlikti elektrinio matavimo prietaisu. Pjezometre gruntinio vandens gylis per visą stebėjimo laikotarpį kito nuo 460 cm (balandis) iki 530 cm (sausis, vasaris) nuo žemės paviršiaus (10 pav.). Per stebėjimo laikotarpį arčiausiai žemės paviršiaus gruntinio vandens lygis buvo vasario – birželio mėnesiais. Gruntinio vandens lygis palaipsniui žemėja ir giliausiai išmatuotas 2012 metų sausį, tuomet jo gylis pasiekia 530 cm nuo žemės paviršiaus.



10 pav. Gruntinio vandens lygio kaita Maišiagalos saugyklos aikštelės aeracijos zonos tyrimų sklypo pjezometre 2010–2012 m.

Analogiški aeracijos zonos tyrimai buvo atlikti Stabatiškės aikštelės vietoje, kur didžiausias aeracijos zonos storis. Čia tyrimams buvo paimti aeracijos zonos grunto nesuardytos sandaros ėminiai iki 450 cm gylio. Pagal granulimetrinės sudėties tyrimų duomenis aeracijos zonos grunto profilyje, naudojant grunto klasifikaciją (Geotechniniai..., 2004), išskirti dulkingo smėlio, smėlingo molingo dulquio, molingo smėlio, smulkus smėlio, smėlingo dulkingo molio sluoksniai (6 lentelė, priedai 1–7). Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos profilio grunto granulimetrinės analizės rezultatai pateikti 6 lentelėje ir prieduose.

6 lentelė. Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos grunto granulimetrinės sudėties (milimetrais) tyrimų rezultatai.

Gylis, cm	Molis	Dulkis			Smėlis			Žvyras
		Smulkus	Vidutinis	Rupus	Smulkus	Vidutinis	Rupus	
	<0,002	0,002-0,0063	0,0063-0,02	0,02-0,063	0,063-0,2	0,2-0,63	0,63-2	>2
30–40	8,00	6,30	8,50	17,30	37,80	15,90	4,70	1,50
50–70	3,60	3,55	4,70	24,60	50,88	9,86	2,07	0,74
70–90	5,47	3,40	6,40	25,80	44,52	11,66	2,40	0,35
90–110	5,70	2,30	6,10	29,30	36,36	15,98	3,67	0,59
120–140	10,90	10,00	10,30	20,90	27,92	14,06	4,20	1,72
150–170	6,60	1,60	3,50	18,68	49,97	15,22	2,40	2,03
170–190	3,25	2,50	5,30	16,90	41,99	23,98	5,22	0,86
190–210	0,45	0,25	1,90	6,50	46,09	33,08	8,92	2,81
210–230	10,90	9,20	13,50	18,40	25,01	12,69	7,71	2,59
230–250	6,40	4,60	10,20	16,50	32,29	22,47	5,61	1,93
265–285	0,00	0,20	1,60	6,80	36,92	47,81	6,20	0,47
300–308	7,80	6,70	10,40	18,40	32,57	16,69	4,74	2,70
310–330	10,60	8,60	12,60	16,00	28,79	14,88	4,67	3,86
330–350	10,90	10,00	10,30	20,90	27,92	14,06	4,20	1,72
355–370	10,40	6,20	12,40	17,20	25,00	14,92	5,98	7,90
420–430	5,20	5,80	11,60	17,60	30,89	19,80	6,23	2,88
430–450	13,90	6,60	11,60	19,70	25,70	14,70	4,40	3,40

Grunto hidraulinis laidis visiško prisotinimo sąlygomis buvo nustatytas Vilniaus universiteto laboratorijoje pagal žemėjančio vandens spūdžio schemą, kai vanduo bandiniu teka laminarine srove. Filtracijos koeficiento vertės nesuardytos sandaros bandiniams kinta nuo 0,000013 iki 0,4 m/para.

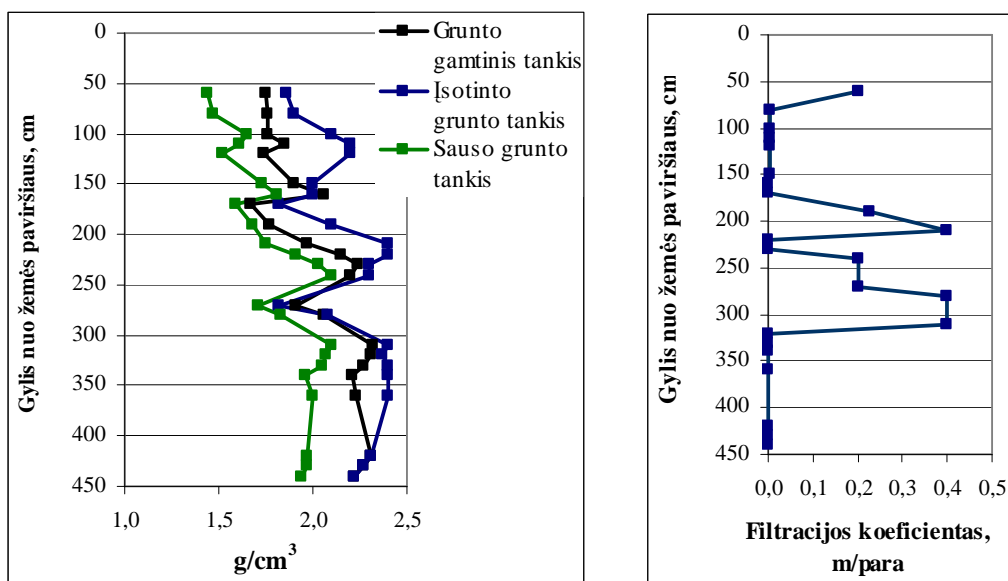
Filtracijos koeficiento vertę galima apskaičiuoti naudojant empirines formules, pvz. Hazeno, Slichterio, Krugerio, Zamarino, Kozeni. Tačiau prof. M. Dobkevičiaus habilitaciniame darbe parodyta, kad filtracijos koeficiento vertės, nustatytos pagal granulimetrinę grunto sudėtį, bei empirines formules dažnai yra nepatikimos (Исследование..., 2002). Todėl šiame darbe filtracijos koeficiento vertės buvo priimtos, atsižvelgiant į laboratorinių tyrimų rezultatus.

7 lentelė. Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos grunto fizikinių-mechaninių savybių tyrimų rezultatai.

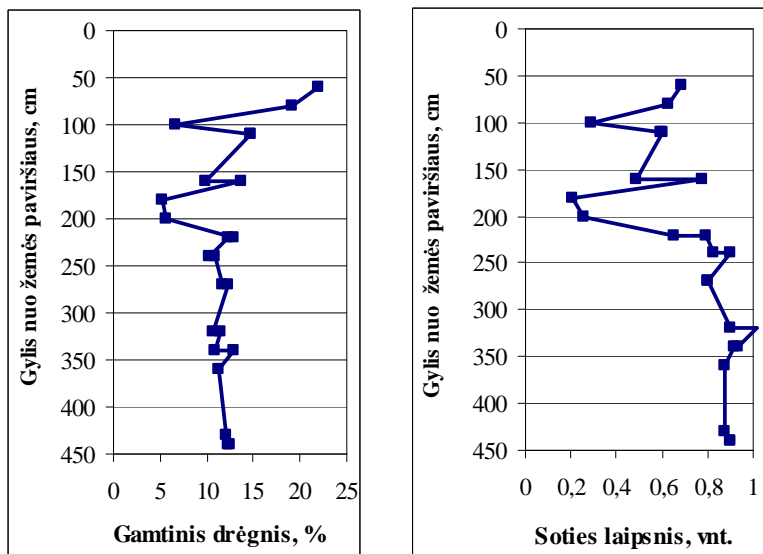
Gylis, (cm)	Grunto gamtinis drėgnis, (%)	Sauso grunto tankis, (g/cm ³)	Įsotinto grunto tankis, (g/cm ³)	Grunto gamtinis tankis, (g/cm ³)	Kietųjų dalelių tankis, (g/cm ³)	Bendras poringumas, (vnt.d.)	Poringumo koeficientas, (vnt.d.)
50–55	22,06	1,44	1,86	1,75	2,67	0,46	0,86
70–75	19,07	1,47	1,90	1,76	2,67	0,45	0,81
90–95	6,74	1,65	2,10	1,76	2,67	0,38	0,62
120–125	14,75	1,61	2,20	1,85	2,69	0,40	0,67
130–135	14,68	1,52	2,20	1,74	2,69	0,44	0,77
150–155	9,82	1,73	2,00	1,90	2,66	0,35	0,54
155–160	13,70	1,81	2,00	2,06	2,66	0,32	0,47
170–175	5,16	1,59	1,82	1,67	2,67	0,40	0,68
190–195	5,72	1,68	2,10	1,77	2,66	0,37	0,59
210–215	12,81	1,75	2,40	1,97	2,66	0,34	0,52
215–220	12,28	1,91	2,40	2,15	2,71	0,29	0,42
230–235	10,30	2,03	2,30	2,24	2,71	0,25	0,34
235–240	10,79	2,10	2,30	2,20	2,69	0,22	0,28
265–275	11,75	1,71	1,82	1,91	2,66	0,36	0,55
275–285	12,23	1,83	2,08	2,06	2,66	0,31	0,45
310–315	10,59	2,10	2,40	2,32	2,71	0,22	0,29
315–320	11,57	2,07	2,37	2,31	2,71	0,24	0,31
330–345	10,95	2,05	2,40	2,27	2,70	0,24	0,32
345–355	12,84	1,96	2,40	2,21	2,70	0,27	0,38
355–360	11,28	2,00	2,40	2,23	2,70	0,26	0,35
420–425	12,08	1,97	2,40	2,31	2,70	0,27	0,37
430–435	12,36	1,97	2,40	2,27	2,70	0,27	0,37
440–445	12,45	1,94	2,40	2,22	2,70	0,28	0,39

Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos grunto fizikinių-mechaninių savybių tyrimų rezultatai pateikti 7 lentelėje ir 11–12 pav. Stabatiškės aeracijos zonos profilį sudaro vidutinio tankumo ir tankūs grunta. Nesuardytos sandaros

sauso grunto tankis sudaro nuo 1,44 g/cm³ iki 2,10 g/cm³, grunto gamtinis tankis 1,67 – 2,33 g/cm³.



11 pav. Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos grunto tankio ir filtracijos koeficiento kaita su gyliu.



12 pav. Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos grunto gamtinio drėgnio ir soties laipsnio kaita su gyliu.

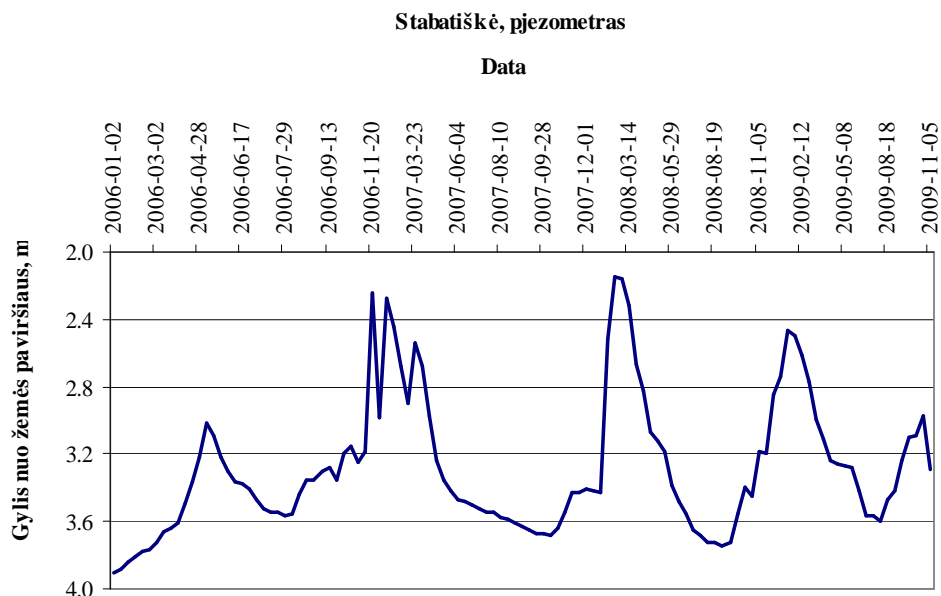
Stabatiškės grunto profilyje grunto gamtinis drėgnis svyruoja nuo 5,16 iki 22,06 %. Išsiskiria keli sluoksniai su mažesniu gamtiniu drėgniu 90 – 95 cm

gylyje -6,74 %, 170 – 175 cm gylyje -5,16%, 190 – 195 cm gylyje -5,72%. Iki 310 cm gylio gruntas yra labai drėgnas, nuo 310 cm gruntas yra prisotintas vandeniu (12 pav.).

8 lentelė. Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos grunto sluoksniai, išskirti pagal grunto granulimetrinės sudėties tyrimų duomenis.

Gylio intervalas, cm	Grunto aprašymas (LST EN ISO 14688-2)
30–40	Dulkingas smėlis
50–140	Smėlingas molingas dulkis
150–170	Molingas smėlis
170–190	Dulkingas smėlis
190–210	Smulkus smėlis
210–230	Smėlingas dulkingas molis
230–260	Dulkingas smėlis
265–285	Smulkus smėlis
310–450	Smėlingas dulkingas molis

Stabatiškės aikštelėje šalia aeracijos zonos profilio ankstesnių tyrimų metu (Stabatiškės..., 2009) buvo įrengtas pjezometras gruntinio vandens lygio stebėjimui ir vandens ėminių paėmimui. Anksčiau atliktų šio pjezometro stebėjimų duomenimis (13 pav.), gruntinio vandens gylis nuo žemės paviršiaus per visą stebėjimo laikotarpį kito nuo 215 cm (balandžio pradžia) iki 391 cm (vasario pabaiga) intervale. Per stebėjimo laikotarpį arčiausiai žemės paviršiaus gruntinio vandens lygis būna sausio – vasario, kovo – birželio mėnesiais, tuomet jo gylis svyruoja nuo 299 iki 215 cm. Gruntinio vandens lygis palaipsniui žemėja ir būna žemiausias vasaros pabaigoje, rudenį, tuomet jo gylis svyruoja nuo 311 iki 391 cm. Gruntinio vandens lygis pjezometre per visą stebėjimo laikotarpį turi panašią svyravimų tendenciją. Pavasario pradžioje būdingas aukščiausias gruntinio vandens lygis, nuo vasaros pradžios lygis palaipsniui žemėja.



13 pav. Gruntinio vandens lygio kaita Stabatiškės aikštelės piezometre 2006–2009 m.

3.1.2. Stabilių izotopų ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ir $^2\text{H}/^1\text{H}$) ir tričio (^3H) pasiskirstymo krituliuose, aeracijos zonos drėgmėje ir gruntiniame vandenyje ypatumai

Atmosferos drėgmės didžiausia dalis globaliu mastu susidaro virš vandenynų subtropinių akvatorių, toliau drėgmė su oro masėmis pernešama Žemės polių kryptimi ir palaipsniui iškrenta su krituliais. Oro masėms judant link aukštesnių platumų ir palaipsniui iškrentant krituliams, sunkesnių izotopų koncentracija sumažėja, nes pirmieji kondensuojasi ir su krituliais iškrenta sunkesni izotopai. Taip einant link aukštesnių platumų kritulių $\delta^{18}\text{O}$ ir $\delta^2\text{H}$ vertės tampa vis labiau neigiamos. Šie dėsniumai atsispindi globalioje meteorinio vandens linijoje (GMWL) (Clark, Fritz, 1997).

Pagal konkretaus regiono lokalią meteorinio vandens liniją, lyginant ją su GMW linija, galima spręsti apie atmosferos drėgmės šaltinio formavimosi padėtį bei jo izotopinės sudėties pasikeitimus dėl antrinio išgaravimo ir maišymosi (Clark, Fritz, 1997).

Išnagrinėjęs GMWL lygties koeficientus W. Dansgaard'as pasiūlė ^2H perteklių globaliu mastu išskrintančiuose krituliuose žymėti simboliu d , išreiškiamu iš GMWL formulės (Dansgaard, 1964):

$$d(\text{‰}) = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}. \quad (2.47)$$

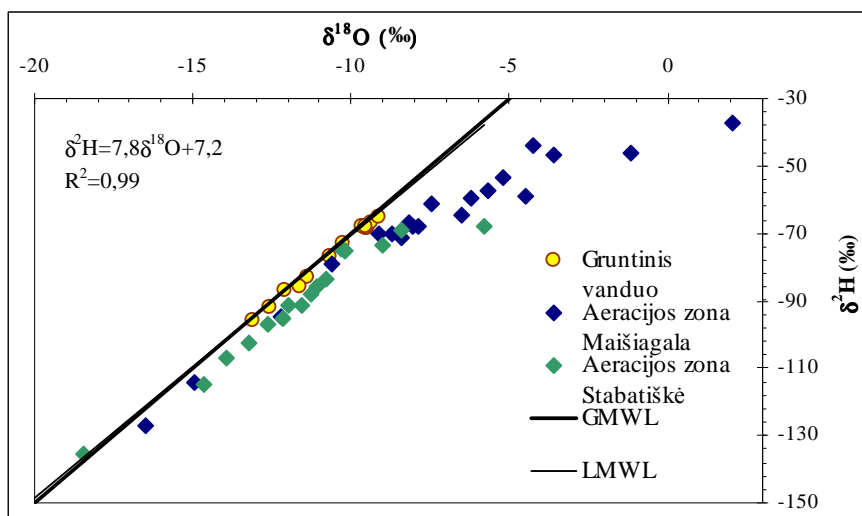
Globaliu mastu d vidutiniškai yra lygus 10‰, tačiau kinta priklausomai nuo oro drėgnumo, vėjo greičio ir vandens paviršiaus temperatūros (Sea Surface Temperature, SST) išgaravimo metu vandenyne. Parametro d vertė 10‰ atitinka vidutinį atmosferos drėgnumą ~85%. Mažėjant atmosferos drėgnumui, d vertė didėja, ir priešingai. Didesnės už 10‰ d vertės rodo atmosferos sausėjimą, o mažesnės – atmosferos drėgmės didėjimą. Papildomai d -pertekliaus vertėms turi įtakos antriniai procesai tokie, kaip išgaravimas ir / ar drėgmės cirkuliacija nuo vietinių paviršinio vandens telkinių (Rozanski et al., 1993).

Kritulių $\delta^{18}\text{O}$ ir $\delta^2\text{H}$ tyrimai šio darbo apimtyje buvo pradėti 2010 m.. Iš viso sukaupta 48 kritulių mėginiai: 24 mėnesių mėginiai Vilniuje (imant momentinius kritulius ir juos susumuojant į mėnesio kritulių mėginį laboratorijoje) ir 24 mėnesių mėginiai Zarasuose (kritulių rinktuve kaupiant 1 mėnesio trukmės kritulius). ^3H nustatymui kritulių mėginiai imami kas mėnesį Zarasuose nenutrūkstamai nuo 1999 m. Maišiagalos aikštelės gruntinio vandens mėginiai buvo imami kas mėnesį nuo 2010 m. spalio mėn., paimta 15 gruntinio vandens mėginių $\delta^{18}\text{O}$ ir $\delta^2\text{H}$ tyrimams ir 20 – ^3H tyrimams. $\delta^{18}\text{O}$ ir $\delta^2\text{H}$ bei ^3H tyrimai atlikti aeracijos zonos grunto drėgmės mėginiuose: 20 mėginių iš Maišiagalos profilio, 17 mėginių iš Stabatiškės profilio.

Remiantis abiejų vietovių kritulių tyrimais $\delta^{18}\text{O}$ aritmetinis vidurkis yra -10,6‰, $\delta^2\text{H}$ aritmetinis vidurkis -75,3‰. Pagal Zarasų kritulių 2010–2011 m. tyrimų duomenis ^3H savitojo aktyvumo vidurkis sudaro 10,4 TV.

Pagal abiejų vietovių kritulių $\delta^{18}\text{O}$ ir $\delta^2\text{H}$ tyrimų duomenis preliminariai buvo nustatyta lokali meteorinio vandens linija (LMWL), kuri rytinei Lietuvos daliai išreiškiama šia lygtimi (14 pav.):

$$d^2H = 7,8d^{18}O + 7,2, R^2 = 0,99. \quad (2.48)$$



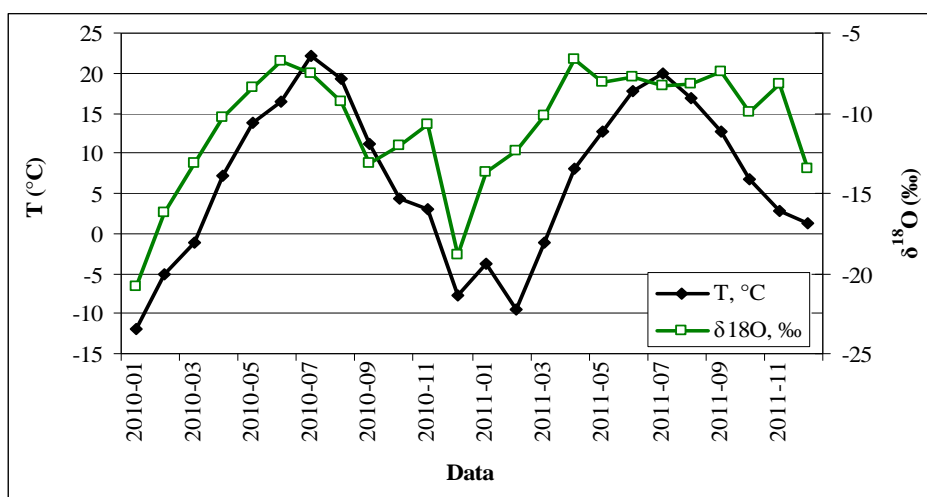
14 pav. $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ grafike pavaizduotas $\delta^{18}\text{O}$ ir $\delta^2\text{H}$ pasiskirstymas krituliuose, gruntiniame vandenyje ir aeracijos zonos grunto drėgmėje.

Greta GMW ir LMW linijų $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ grafike pavaizduoti visi stabilių izotopų tyrimų duomenys. Gruntinio vandens duomenys išsidėsto ant GMW ir LMW linijų. Aeracijos zonos duomenys nukrypsta į dešinę nuo minėtų linijų, tačiau Maišiagalos aikštelės duomenys labiau nukrypsta. Tai rodo intensyvesnį išgaravimą.

Kaip ir globaliu mastu (Rozanski et al., 1982), taip ir tirtų vietovių atveju stebimas sąryšis tarp kritulių izotopinės sudėties ir jų formavimosi vietovės oro vidutinės mėnesio temperatūros (15–16 pav., 8 lentelė).



15 pav. Oro vidutinės mėnesio temperatūros ir kritulių $\delta^{18}\text{O}$ ir kaita 2010–2011 m. (temperatūros duomenys – Vilniaus stotis, $\delta^{18}\text{O}$ – Vilnius).



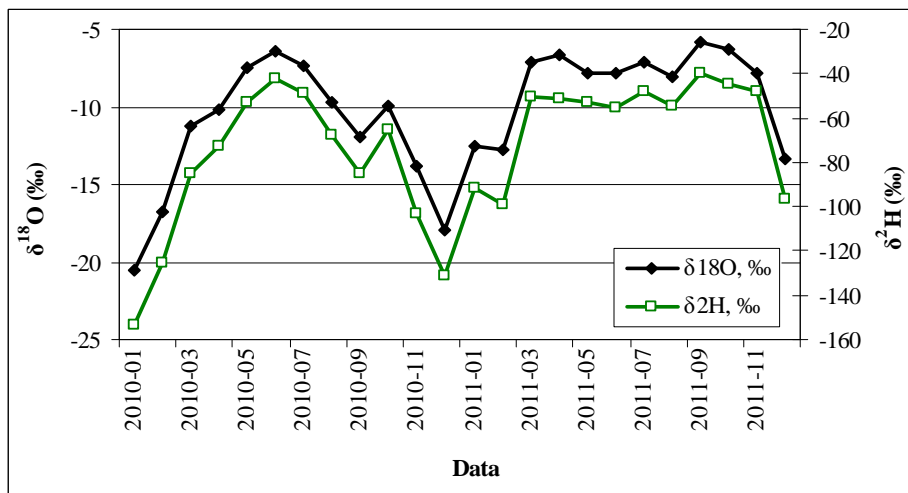
16 pav. Oro vidutinės mėnesio temperatūros ir kritulių $\delta^{18}\text{O}$ kaita 2010–2011 m. (temperatūros duomenys – Dūkšto stotis, $\delta^{18}\text{O}$ – Zarasai)

Pagal abiejų vietovių kritulių temperatūros ir $\delta^{18}\text{O}$ duomenis buvo nustatytas sąryšis tarp kritulių izotopinės sudėties ir jų formavimosi vietovės oro vidutinės mėnesio temperatūros:

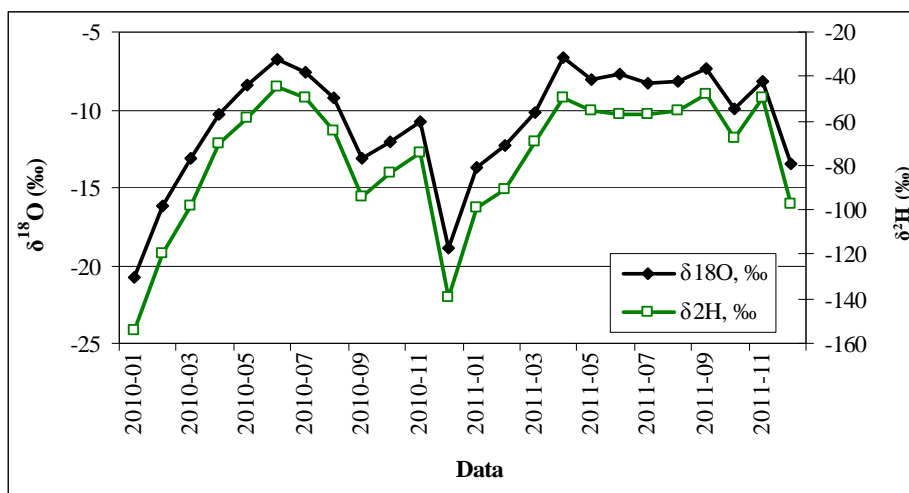
$$\delta^{18}\text{O} = 0,31T - 12,42 \quad R^2 = 0,56 \quad (\text{Vilnius}) \quad (2.49)$$

$$\delta^{18}\text{O} = 0,30T - 12,85 \quad R^2 = 0,64 \quad (\text{Zarasai}) \quad (2.50)$$

Šiltuoju metų laikotarpiu būdingos mažiau neigiamos kritulių izotopinės sudėties vertės palyginus su šaltuoju laikotarpiu. Mėnesio kritulių $\delta^{18}\text{O}$ vertės svyruoja nuo $-20,5\text{‰}$ (sausyje) iki $-5,8\text{‰}$ (rugsėyje), o $\delta^2\text{H}$ atitinkamai – nuo $-154,2\text{‰}$ iki $-39,4\text{‰}$ (17-18 pav).

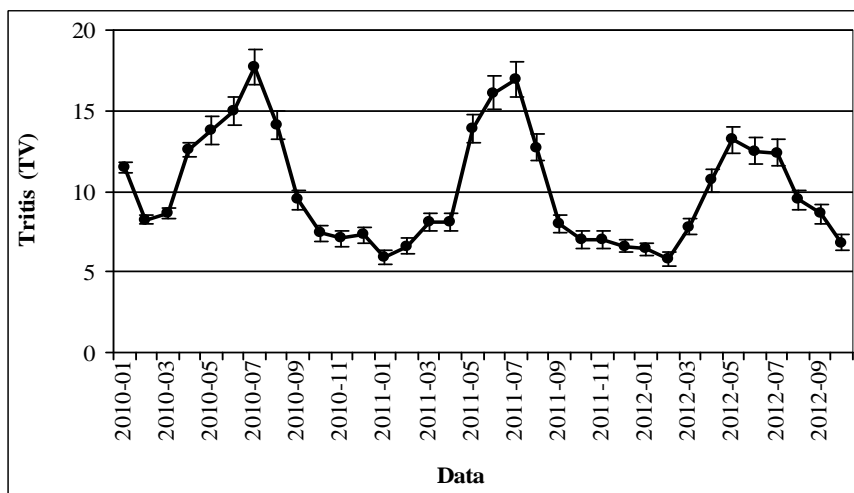


17 pav. Kritulių $\delta^{18}\text{O}$ ir $\delta^2\text{H}$ kaita 2010–2011 m. Vilniuje.



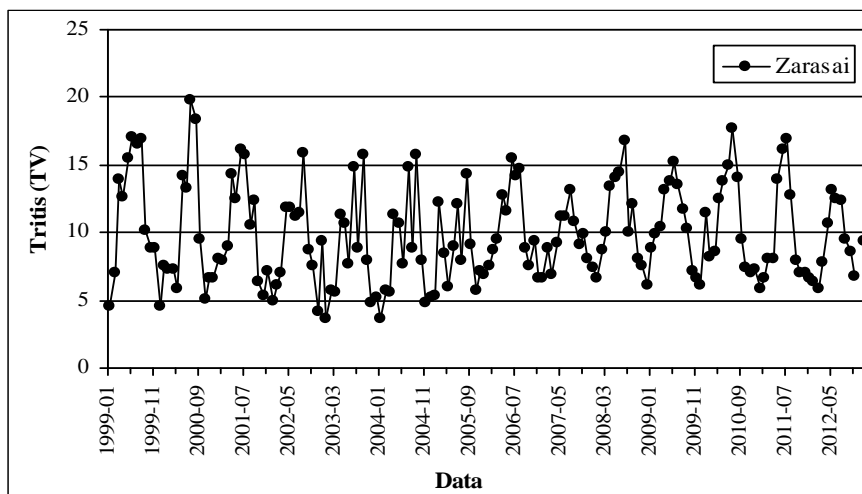
18 pav. Kritulių $\delta^{18}\text{O}$ ir $\delta^2\text{H}$ kaita 2010–2011 m. Zarasuose.

^3H sezoninės variacijos krituliuose, kaip ir stabilių izotopų, turi panašią metinę kaitos tendenciją su maksimaliomis vertėmis šiltuoju metų laikotarpiu (19 pav).



19 pav. ^3H koncentracijos krituliuose kaita Zarasuose 2010–2012 m.

Tačiau ilgalaikiu aspektu, greta sezoninių variacijų, ^3H būdingas aktyvumo mažėjimo trendas (pvz., nuo 11,4 TV vidurkio 1999 m. iki 9,4 TV vidurkio 2012 m.) dėl termobranduolinių sprogdinimų kilmės ^3H rezervuaro atmosferoje išsekimo (20 pav.).



20 pav. ^3H koncentracijos krituliuose kaita Zarasuose 1999–2012 m.

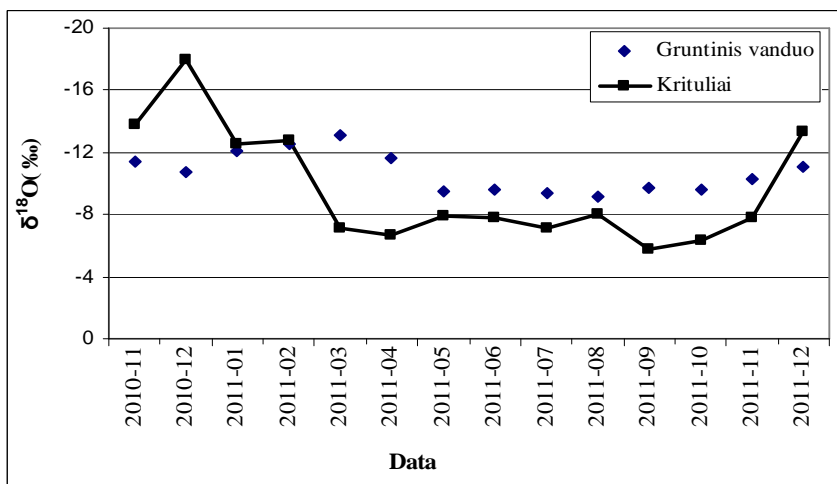
Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos tyrimų aikštelės pjezometro gruntiniame vandenyje stabilų izotopų sudėties neigiamiausios vertės ($\delta^{18}\text{O} = -13,1\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -96,1\text{‰}$) buvo nustatytos kovo mėnesį, o mažiausiai neigiamos ($\delta^{18}\text{O} = -9,1\text{‰}$, $\delta^2\text{H} = -65,1\text{‰}$) rugpjūtį (9 lentelė, 21 pav.). Craig'o diagramoje

gruntinio vandens izotopinės sudėties duomenys išsidėsto ant meteorinio vandens linijos (14 pav.).

9 lentelė. Gruntinio vandens izotopinė sudėtis.

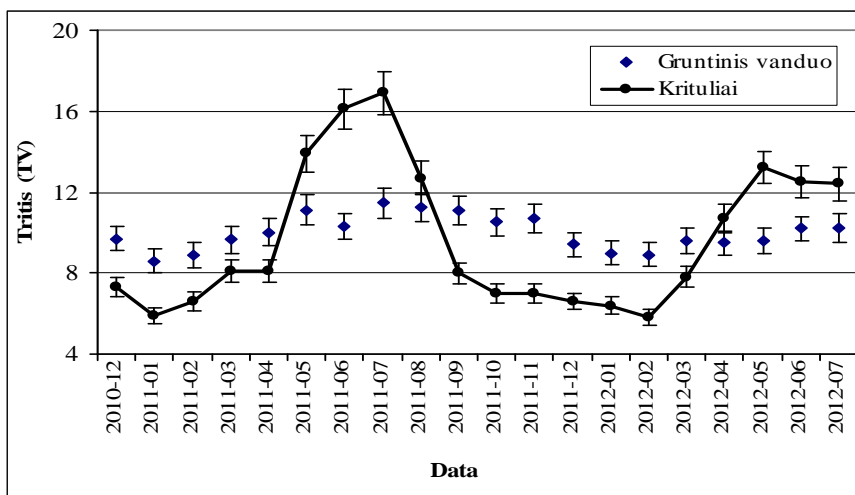
Data	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	^3H , TV
2010–11	-11,4	-82,9	n.d.
2010–12	-10,7	-76,8	9,7 \pm 0,6
2011–01	-12,1	-86,8	8,6 \pm 0,6
2011–02	-12,6	-91,8	8,9 \pm 0,6
2011–03	-13,1	-96,1	9,6 \pm 0,6
2011–04	-11,6	-85,8	10,0 \pm 0,7
2011–05	-9,5	-68,5	11,1 \pm 0,8
2011–06	-9,6	-68,6	10,3 \pm 0,7
2011–07	-9,4	-66,9	11,5 \pm 0,7
2011–08	-9,1	-65,1	11,3 \pm 0,7
2011–09	-9,7	-68,2	11,1 \pm 0,7
2011–10	-9,6	-68,1	10,5 \pm 0,7
2011–11	-10,3	-72,8	10,7 \pm 0,7
2011–12	-11,1	-79,4	9,4 \pm 0,6
2012–01	-11,4	-80,7	9,0 \pm 0,6
2012–02	n.d.	n.d.	8,9 \pm 0,6
2012–03	n.d.	n.d.	9,6 \pm 0,6
2012–04	n.d.	n.d.	9,5 \pm 0,6
2012–05	n.d.	n.d.	9,6 \pm 0,6
2012–06	n.d.	n.d.	10,2 \pm 0,6
2012–07	n.d.	n.d.	10,2 \pm 0,7

Gruntinį vandenį formuoja dabartiniai krituliai. Dėl nuotėkio ir išgaravimo tik nedidelė dalis kritulių papildo gruntinį vandenį. Lietuvai būdingose klimatinėse sąlygose gruntinio vandens izotopinė sudėtis yra artima kritulių metinei izotopinei sudėčiai, nes per palyginus lėtai vykstančius infiltracijos procesus krituliuose stebimos metinės izotopinės sudėties variacijos gruntiniame vandenyje dažniausiai (išskyrus greitos infiltracijos atvejus) išsilygina (21 pav).



21 pav. $\delta^{18}\text{O}$ kaita gruntiniame vandenyje (Maišiagalos aikštelė) ir krituliuose (Vilnius).

^3H koncentracijos krituliuose (Zarasai) ir gruntiniame vandenyje (pagal Maišiagalos pjezometro duomenis) palyginimas pateiktas 22 pav.



22 pav. ^3H koncentracijos kaita gruntiniame vandenyje (Maišiagalos aikštelė) ir krituliuose (Vilnius).

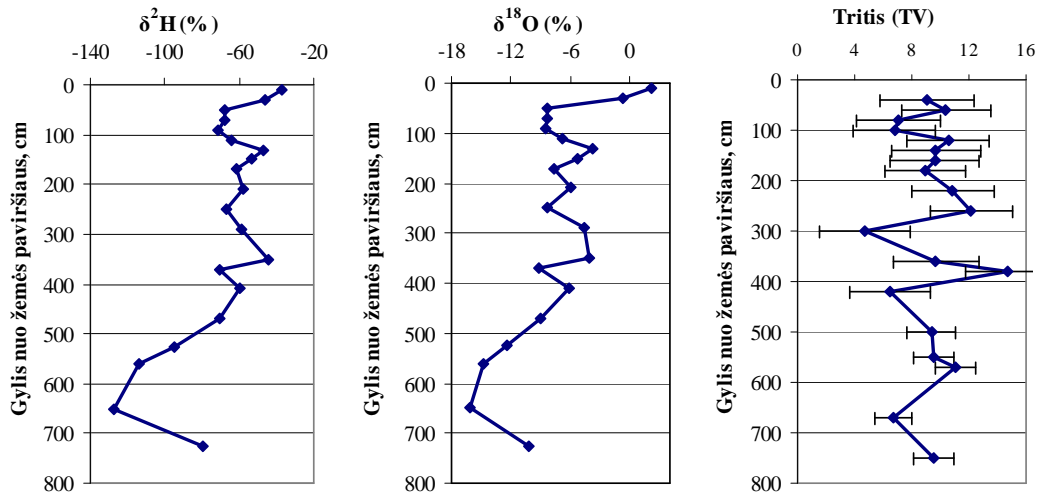
Lyginant su krituliams būdingoms ^3H variacijoms (10 lentelė), gruntiniame vandenyje ^3H svyravimų amplitudė labai nedidelė (vidurkis artėja prie 10 TV), tačiau vasaros laikotarpiui būdingos šiek tiek didesnės ^3H koncentracijos (iki

12 TV). Apskritai gruntiniam vandeniui būdingos ^3H koncentracijos vertės, kurios krituliuose yra pavasariį ir rudenį.

10 lentelė. Mėnesio kritulių izotopinės sudėties ir mėnesio oro temperatūros vidurkio duomenys.

Data	Vilnius, T°C	Krituliai Vilnius, $\delta^{18}\text{O}$, ‰	Krituliai Vilnius, $\delta^2\text{H}$, ‰	Dūkštas, T°C	Krituliai Zarasai, $\delta^{18}\text{O}$, ‰	Krituliai Zarasai, $\delta^2\text{H}$, ‰	Krituliai Zarasai, ^3H , TV
2010-01	-10,4	-20,5	-153,2	-11,9	-20,8	-154,2	11,5±0,4
2010-02	-4,1	-16,7	-125,7	-5,2	-16,2	-120,0	8,2±0,3
2010-03	0,2	-11,3	-85,0	-1,1	-13,1	-98,4	8,6±0,3
2010-04	7,6	-10,2	-73,1	7,3	-10,3	-70,6	12,6±0,4
2010-05	14,0	-7,5	-53,1	13,8	-8,4	-59,0	13,8±0,9
2010-06	16,7	-6,37	-42,0	16,5	-6,8	-44,7	15,0±0,9
2010-07	21,8	-7,35	-48,9	22,1	-7,6	-49,8	17,7±1,1
2010-08	19,8	-9,76	-67,7	19,3	-9,3	-64,3	14,1±0,9
2010-09	11,4	-11,94	-84,9	11,2	-13,2	-93,8	9,5±0,6
2010-10	4,4	-9,96	-65,6	4,4	-12,1	-83,7	7,4±0,5
2010-11	3,7	-13,83	-102,8	3,1	-10,8	-74,4	7,1±0,5
2010-12	-7,5	-17,92	-131,2	-7,7	-18,9	-139,0	7,3±0,5
2011-01	-3,3	-12,51	-91,6	-3,9	-13,7	-99,2	5,9±0,4
2011-02	-7,5	-12,72	-99,0	-9,6	-12,3	-91,0	6,6±0,5
2011-03	-0,2	-7,07	-50,6	-1,2	-10,2	-69,7	6,6±0,5
2011-04	8,7	-6,66	-51,4	8,0	-6,6	-49,2	8,1±0,4
2011-05	12,9	-7,87	-53,1	12,6	-8,1	-55,3	8,1±0,5
2011-06	18,3	-7,78	-55,3	17,8	-7,7	-57,1	16,1±0,6
2011-07	19,6	-7,09	-48,4	20	-8,2	-56,9	16,9±0,6
2011-08	17,3	-8,03	-54,9	16,9	-8,2	-55,0	12,7±0,9
2011-09	13,3	-5,79	-39,4	12,7	-7,4	-48,1	8,0±1,0
2011-10	6,6	-6,32	-45,1	6,7	-10,0	-68,0	7,0±1,1
2011-11	2,9	-7,81	-48,4	2,8	-8,2	-49,4	7,0±0,8
2011-12	1,2	-13,4	-96,8	1,2	-13,5	-97,0	6,60±0,5
Aritmetinis vidurkis	7,0	-10,3	-73,0	6,5	-10,9	-77,0	10,1±0,5
Pasvertasis vidurkis	-	-9,4	-66	-	-10,5	-70,4	11,6±0,7
Minimumas	-10,4	-20,5	-153,2	-11,9	-20,8	-154,2	5,9±0,5
Maksimuma	21,8	-5,8	-39,4	22,1	-6,6	-44,7	17,7±0,4

Iš aeracijos zonos grunto mėginių vakuuminės distiliacijos būdu buvo išgautos drėgmės izotopinės sudėties ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, ^3H savitasis aktyvumas) duomenys pateikti 11 lentelėje ir 23 pav.



23 pav. $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, ^3H pasiskirstymas Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos profilyje 2010–11–02.

Maišiagalos aeracijos zonos profilio drėgmėje $\delta^{18}\text{O}$ ir $\delta^2\text{H}$ vertės kinta plačiuose intervaluose, atitinkamai nuo 2,1 iki -9,1‰ ir nuo -37,5 iki -70,3 ‰. Tame pačiame profilyje iš gruntinio vandens sluoksnio viršutinės dalies paimto grunto vandens izotopinei sudėčiai būdingos neigiamesnės δ rodiklių vertės, atitinkamai -16,5 ‰ ir -127,3 ‰. Šiame intervale (600–670 cm) ir ^3H koncentracija būdinga žiemos krituliams, tai rodo, kad gruntiniame vandenyje yra dalis pavasarį išfiltravusio sniego tirpsmo vandens.

Profilio viršutinėje dalyje yra izotopiniu požiūriu daug sunkesnis vanduo (mažiau neigiamos vertės), čia stebimas izotopų sudėties praturtinimas dėl intensyvaus garavimo ir drėgmės pasisavinimo augalų šaknimis. Su gyliu aeracijos zonos profilyje stabiliųjų izotopų δ vertės tampa labiau neigiamomis (23 pav.).

Iki 450 cm nuo žemės paviršiaus gruntas yra orasausis, soties vandeniu laipsnis čia sudaro 0,1–0,2, gamtinis drėgnis svyruoja nuo 1 iki 7 %. Nuo 450 cm gylio grunto gamtinis drėgnis didėja ryškiai didėja, nuo 489 cm gylio gruntas yra prisotintas vandeniu.

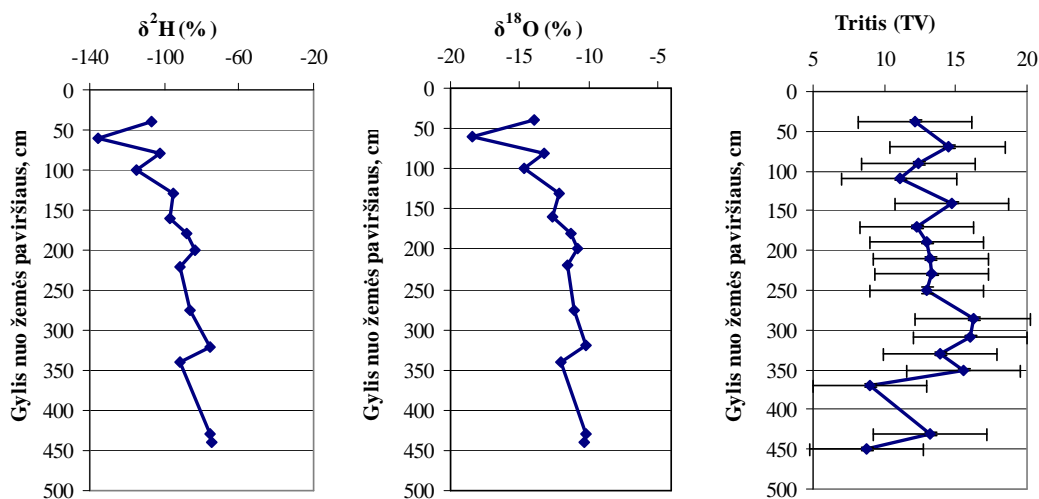
11 lentelė. Maišiagalos aeracijos zonos profilio grunto drėgmės izotopinė sudėtis (apytikriai 500 cm gylyje yra gruntinis vanduo, gruntinio vandens lygis nusistovi tyrimų momentui 489 cm).

Gylis, cm	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	^3H koncentracija, TV
Neįsotintas gruntas			
0–20	2,1	-37,5	n.d
20–40	-1,2	-46,1	9,1±3,3
40–60	-7,9	-68,0	10,4±3,1
60–80	-8,1	-67,9	7,1±3,0
80–100	-8,4	-71,2	6,8±2,9
100–120	-6,5	-64,5	10,5±2,9
120–140	-3,6	-46,7	9,7±3,1
140–160	-5,2	-53,5	9,6±3,1
160–180	-7,4	-61,1	9,0±2,9
200–220	-5,7	-57,5	10,9±2,9
240–260	-8,2	-66,8	12,1±2,9
280–300	-4,5	-59,0	4,7±3,2
340–360	-4,3	-44,2	9,7±3,0
360–380	-9,1	-70,3	14,7±2,9
400–420	-6,2	-59,8	6,4±2,9
450–500	-8,7	-70,3	9,5±1,7
Įsotintas gruntas (žemiau gruntinio vandens lygio)			
500–550	-12,2	-94,7	9,5±1,4
550–570	-14,9	-114,2	11,1±1,4
600–670	-16,5	-127,3	6,7±1,3
700–750	-10,6	-79,2	9,5±1,4

Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos profilio drėgmėje $\delta^{18}\text{O}$ ir $\delta^2\text{H}$ vertės kinta atitinkamai nuo -10,2‰ iki -18,4‰ ir nuo -74,6‰ iki -135,6‰ (12 lentelė). Grunto profilio viršutinėje dalyje yra izotopiniu požiūriu lengvesnis vanduo, t.y. labiau neigiamos δ rodiklių vertės. Grunto gamtinis drėgnis svyruoja nuo 22,1% 50–70 cm gylyje smėlingame molingame dulkyje iki 5,2% dulkingame smėlyje. Giliau nei 230 cm nuo žemės paviršiaus grunto gamtinis drėgnis mažai svyruoja ir sudaro apie 11,6% (24 pav.). Aeracijos zonos grunto drėgmės izotopinė sudėtis su gyliu tampa mažiau neigiama (24 pav.). Trys izotopinės sudėties rezultatai (230–250 cm, 300–308 cm ir 355–370 cm gylio intervalai) grafike (24 pav.) neįtraukti, kadangi šie bandiniai buvo pažeistos

struktūros ir nepakankamai izoliuoti, todėl galėjo patirti izotopinę sudėtį keičiantį papildomą išgaravimą saugojimo laboratorijoje metu.

^3H koncentracija Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos profilio drėgmėje svyruoja nuo 8,8 TV iki 16,2 TV. Kadangi iš aeracijos zonos normaliomis sąlygomis neįmanoma išgauti tiek drėgmės (apie 500 ml vandens pavidalu), kad pakaktų bandinio praturtinimui ^3H elektrolizės būdu, tai be praturtinimo išmatuotiems dydžiams būdingos didokos neapibrėžtys. Tačiau ir šiuo atveju pastebima ^3H pasiskirstymo smailių aktyvumo didėjimo su gyliu tendencija iki 350 cm gylio, atitinkanti ankstesnių metų ^3H krituliuose signalą. ^3H smailių skaičius dėl išsilyginimo ir paklaidų negali būti tiksliai įvertinamas, tačiau galima išskirti 5–6 smailes, atitinkančias skirtingų metų ^3H krituliuose didesnių koncentracijų indėlį. Maišiagalos aikštelės ^3H koncentracijos aeracijos zonos drėgmės profilyje taip pat galima išskirti atskiras ^3H smailes, tačiau jų skaičius čia mažesnis (3–4 smailės). Tai byloja apie greitesnę drėgmės pernašą Maišiagalos aikštelėje, lyginant su Stabatiškės aikštele.



24 pav. $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, ^3H pasiskirstymas Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos profilyje 2011–06–07.

12 lentelė. Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos profilio grunto drėgmės izotopinė sudėtis.

Gylis, cm	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	^3H koncentracija, TV
30–40	-14,0	-107,2	12,2±1,8
50–70	-18,4	-135,6	14,4±1,8
70–90	-13,2	-102,6	12,4±1,7
90–110	-14,7	-115,0	11,0±1,7
120–140	-12,2	-95,0	14,8±1,7
150–170	-12,6	-97,0	12,3±1,7
170–190	-11,3	-87,8	12,9±1,7
190–210	-10,8	-83,7	13,3±1,7
210–230	-11,6	-91,3	14,0±1,5
230–250	-9,0	-73,4	12,9±3,4
265–285	-11,1	-86,0	16,2±1,8
300–308	-5,8	-67,7	16,0±1,5
310–330	-10,2	-75,3	13,9±1,7
330–350	-12,0	-91,6	15,0 ±1,8
355–370	-8,4	-69,1	9,0±1,5
420–430	-10,2	-75,3	13,2±1,8
430–450	-10,3	-74,6	8,8±1,7

Kaip jau minėta krituliuose pasireiškiančios stabilųjų izotopų sezoninės variacijos aeracijos zonoje ir ypač gruntiniame vandenyje beveik išnyksta, tačiau ir čia abejose aikštelėse išlieka nežymūs sezoninių smailių pėdsakai, kurie Maišiagalos aikštelėje yra šiek tiek kontrastiškesni nei Stabatiškės aikštelėje, kadangi Maišiagalos aikštelėje drėgmės tranzito aeracijos zonoje laikas turėtų būti trumpesnis.

Stabiliųjų izotopų ($\delta^{18}\text{O}$ ir $\delta^2\text{H}$) ir ^3H pasiskirstymo krituliuose, aeracijos zonos drėgmėje ir gruntiniame vandenyje duomenys kartu su gruntų fizikinių-mechaninių savybių duomenimis gali būti panaudojami aeracijos zonos modelių pagrindimui.

3.2. Drėgmės ir priemaišų pernašos aeracijos zonoje modeliai

Atlikus eksperimentinius tyrimus ir apibendrinus duomenis apie gruntų hidraulinės savybes, drėgnį ir izotopinę sudėtį, Maišiagalos ir Stabatiškės

aikštelių aeracijos zonos profiliai buvo palyginti, atsižvelgiant į drėgmės ir priemaišų pernašą aeracijos zonoje.

Pagal granulimetrinės analizės duomenis Maišiagalos aikštelės aeracijos zona sudaryta iš vienos frakcijos grunto – smėlio. Prisotinto grunto hidraulinis laidis (K_s) svyruoja nuo 1,5 iki 3,9 m/para, vidurkis sudaro 2,3 m/para. Čia aeracijos zonoje nėra sluoksnių su mažu hidrauliniu laidumu. Vidutinis gruntinio vandens slūgsojimo gylis yra 5 m. Priešingai nei Maišiagalos aikštelėje, Stabatiškės aikštelės aeracijos zona yra labiau heterogeniška ir santykinai mažiau laidu. Prisotinto grunto hidraulinis laidis (K_s) Stabatiškės aikštelėje kinta nuo $1,3 \times 10^{-5}$ iki 0,2 m/para ir vidutiniškai yra $8,2 \times 10^{-2}$ m/para. Vidutiniškai gruntinio vandens lygis yra 3,2 m gylyje nuo žemės paviršiaus. Pagal rodiklio K_s ir granulimetrinės sudėties kaitą čia gali būti išskirti bent 5 skirtingi grunto sluoksniai. Maišiagalos aikštelėje aeracijos zona yra labiau laidu, bet storesnė negu Stabatiškės aikštelėje. Stabatiškės aikštelėje aeracijos zona yra mažiau laidu, tačiau gruntinio vandens lygis yra arčiau žemės paviršiaus.

Aeracijos zonos modeliavimo užduotys:

- remiantis eksperimentinių tyrimų rezultatais, pagrįsti grunto hidraulinės funkcijas, t.y. įsiurbiamo slėgio priklausomybę nuo grunto drėgnio, hidraulinio laidžio – nuo įsiurbiamo slėgio, hidraulinio laidžio – nuo grunto drėgnio;
- įvertinti infiltracijos srautą ir konservatyvių priemaišų pernašą aeracijos zonos dvejuose profiliuose (Maišiagala ir Stabatiškė), pagrįdžiant modelius *in situ* tyrimų ir laboratorinių eksperimentų rezultatais.

Tyrimuose panaudotas baigtinių elementų metodas, realizuotas programa HYDRUS-1D (Šimunek et al., 2008). HYDRUS 1D yra modeliavimo programa, kuria, taikant aeracijos zonos fizikinius dėsnius, patogu modeliuoti vienmatį vandens srautą grunto profilyje. Kaip jau minėta anksčiau, aeracijos zonos poringoje terpėje vandens judėjimą išreiškiančių skaitinių sprendimų suradimui šioje programoje naudojama netiesinė

Richards'o lygtis. Grunto hidraulinių savybių nustatymui programoje HYDRUS naudojamos parametrai α , n , l (empiriniai koeficientai) generuojančios empirinės funkcijos. Grunto hidraulinės savybės išreiškiamos analitiškai, naudojant van Genuchten'o funkcijas (1980), taip pat modifikuotas van Genuchten'o funkcijas (Vogel, Cislérova, 1988).

Abejuose profiliuose jų geometrija įvertinta, atsižvelgiant į vidutinės gruntinio vandens gylio vertes: aeracijos zonos storis Maišiagalos aikštelėje priimtas 5 m, Stabatiškės aikštelėje – 3,2 m. Drėgmės pernašos ir sulaikymo charakteristikų nustatymui buvo panaudotos automatiškai programoje įdiegtos van Genuchten'o empirinės lygtys.

Atsižvelgiant į nagrinėjamus scenarijus, saugos analizei skirtuose modeliuose ir palyginimuose neišvengiami, o kartais ir būtini sąlygų supaprastinimai. Šiuose tyrimuose buvo padarytos vienodos abiem aikštelėms įvairios prielaidos. Iš pradžių priimtas labai konservatyvus atvejis, kai abiejų aikštelių viršutinėje riboje susiformuoja tam tikras pastovus vandens lygis (pagal saugos analizės supratimą tai yra užtvindymo scenarijus), kuris nagrinėtas 3 atvejais: žemas, vidutinis ir aukštas vandens lygis. Vanduo nuo žemės paviršiaus sunkėsi grunte vertikaliai žemyn iki gruntinio vandeningo sluoksnio. Pradinės drėgmės grunte sąlygos buvo apibrėžtos tokios, kokios buvo nustatytos eksperimentinių tyrimų eigoje, priimant, kad to momento grunto drėgnis reprezentuoja vidutinės jo vertes. Apatinė ribinė sąlyga buvo nustatyta, kaip gruntinio vandens lygis, o viršutinė buvo apibrėžta, atsižvelgiant į minėtus scenarijus.

Programa HYDRUS leidžia modeliuoti sudėtingą priemaišų (medžiagų) pernašą aeracijos zonoje, esant pusiausvyros ir nepusiausvyros sąlygoms. Šiame darbe buvo pasirinktos pusiausvyros sąlygos, siekiant sumodeliuoti greičiausių priemaišų sklidimo atvejį, esant panašioms ribinėms sąlygom abejuose aikštelėse. Priemaišų įvedimui buvo nagrinėjami du scenarijai, kai yra momentinis ir nuolatinis jų patekimas viršutinėje riboje.

Priklausomai nuo nagrinėjamų procesų, priemaišų pernašos modeliavimui reikalingi tam tikri transporto (migracijos) parametrai. Esant

pusiausvyros sąlygoms, reikia įvesti šių parametru vertes: išilginio dispersiškumo, molekulinės difuzijos koeficiento laisvame vandenyje, molekulinės difuzijos koeficiento grunto ore (jei atsižvelgiama į difuziją). Esant nepusiausvyros sąlygoms, reikia įvesti šių parametru vertes: bedimensės adsorbcijos dalies (FRAC) (lygi 1 pusiausvyros sąlygoms), nejudraus vandens kiekio (lygus 1 pusiausvyros sąlygoms), adsorbcijos izotermos koeficientu ($K_d=0$, $Nu=0$, $\beta=0$ pusiausvyros sąlygoms). Taip pat reikalingos šių parametru vertės: skysčio-dujų pusiausvyros pasiskirstymo konstantos, su kieta ir skysta fazėmis susijusių priemaišų reakcijų spartos nulinės ir pirmos eilės konstantos.

Priemaišų pernašos uždavinyje konservatyviai atsižvelgta į advekcijos ir dispersijos procesus be sulėtinimo (retardacijos). Nagrinėjant šį uždavinį, reikia įvesti dispersiškumo parametro vertę. Dispersiškumas yra nagrinėjamo sluoksnio parametras, kuris nepriklauso nuo priemaišų (medžiagų) ypatybių. Siekiant abejų aikštelių palyginimo, dispersiškumas buvo priimtas vienodas abejose aikštelėse. Apibrėžiant padines masės sąlygas, buvo priimta, kad aeracijos zonoje nėra jokių priemaišų (foninė koncentracija $C_o=0$).

Priemaišų momentinio įvedimo atveju šis procesas praėjus 1 dienai sustoja. Esant nuolatiniam priemaišų įvedimui, šis procesas tęsiasi. Priemaišų koncentracija buvo priimta 100 vienetų (masė ar aktyvumas tūrio vnt.). Drėgmės judėjimo kryptis aeracijos zonoje priklauso nuo kritulių ir evaporacijos. Siekiant įvertinti potencialų garavimą, reikia daug meteorologinių parametru: šiluminės radiacijos, debesuotumo, minimalios ir maksimalios paros temperatūros, drėgmės, vėjo greičio ir kt. (Penman-Monteith (Monteith, 1981), Hargreaves (Jensen et al., 1997), energijos balanso metodai).

Vandens kiekis aeracijos zonoje priklauso nuo kritulių kiekio, vandens judėjimo aukštyr dėl evaporacijos ir žemyn iki gruntinio vandens. Turint pilną parametru verčių rinkinį, galima nustatyti aeracijos zonos grunto drėgmės svyravimus.

Vandens srauto ir priemaišų pernašos, esant žemam, vidutiniškam ir aukštam slėgiui; momentiniam ir pastoviam priemaišų įvedimui, palyginimui buvo išnagrinėti šeši scenarijai (13 lentelė). Kiek vandens patenka į aeracijos zoną, priklauso nuo užduoto slėgio kitimu kaip slėgis: mažas vandens kiekis – slėgis +1 cm, vidutinis vandens kiekis – slėgis +10 cm, didelis vandens kiekis – slėgis +50 cm. Procesų vyksmas modeliuotas 1000 dienų laikotarpiui, siekiant, kad priemaišos būtų perneštos nuo viršutinės iki apatinės modelio ribos. Konkrečias medžiagas apibūdinančios reakcijos (skilimas, sorbcija ir retardacija) nebuvo nagrinėtos, tačiau buvo priimta, kad priemaišos yra konservatyvios (nėra radioaktyvaus skilimo, reakcijų, sorbcijos-desorbcijos ir retardacijos procesų).

13 lentelė. Vandens slėgio ir priemaišų koncentracijos pradinės vertės, pasirinktos skirtinguose scenarijuose.

Įeities koncentracija (100 vnt.)	Vandens Slėgis (cm)		
	Žemas	Vidutinis	Aukštas
Momentinis įvedimas	1	10	50
Nuolatinis įvedimas	1	10	50

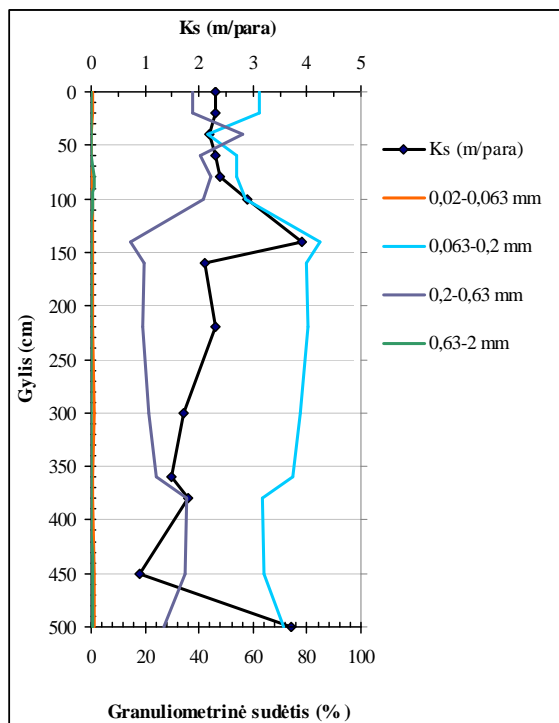
3.2.1. Modelių geometrija, parametrai ir ribinės sąlygos

Maišiagalos aikštelės profilis

Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos grunto granuliometrinė sudėtis buvo nustatyta laboratorijoje ir apibendrinta 4 lentelėje (žiūr. 3.1.1 skyriuje). Gruntą sudaro smulkus (0,063–0,2) ir vidutinis (0,2–0,63) smėlis, prisotinto grunto filtracijos koeficiento vertės kinta nuo 0,9 iki 3,9 m/para (25 pav.).

Parametro K_s variacijos nėra didelės, maksimali vertė (3,9 m/para) buvo nustatyta 120–140 cm gylyje, o minimali (0,9 m/para) – 400–450 cm gylyje. Vidutinė prisotinto grunto filtracijos koeficiento vertė yra 2,3 m/para. Modelio sudarymui grunto profilis buvo padalintas į 7 sluoksnius, atsižvelgiant į

filtracijos koeficiento kaitą. Modelio sluoksnių filtracijos koeficiento vertės pateiktos 14 lentelėje.



25 pav. Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos grunto filtracijos koeficiento (esant pilnam prisotinimui) ir granulimetrinės sudėties pasiskirstymas su gyliu.

14 lentelė. Maišiagalos aikštelės modelio sluoksnių filtracijos koeficiento vertės.

Sluoksniis	Medžiaga	Gylis (cm)	K_s (m/para)
1	1	0–80	2,3
2	2	80–100	2,8
3	3	100–140	3,9
4	1	140–250	2,3
5	4	250–400	1,7
6	5	400–450	0,9
7	3	450–500	3,9

Vandens srauto aeracijos zonoje apibūdinimui naudojami šie parametrai: liekaninis drėgmės kiekis (θ_r), soties drėgnis (θ_s), prisotinto grunto filtracijos koeficientu (K_s) ir aeracijos zonos grunto hidraulinės funkcijos

(drėgmės sulaikymo ir drėgmės laidumo). Gana daug įvairių metodų, pagrįstų bandymais laboratorijoje ir lauko sąlygose, yra naudojami neišotinto grunto hidraulinio laidumo funkcijų nustatymui. Šiame darbe drėgmės sulaikymo ir drėgmės laidumo funkcijos buvo nustatytos empiriniais metodais, remiantis granulimetrine sudėtimi ir grunto tankiu. Hidraulinių savybių nustatymui pagal granulimetrinę sudėtį ir tankį programoje HYDRUS yra įdiegta sistema ROSETTA (Schaap et al., 2001). Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos gruntu kiekvieno sluoksnio hidraulinių savybių ir funkcijų koeficientų vertės pateiktos lentelėje 15.

15 lentelė. Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos gruntu hidraulinių savybių ir funkcijų koeficientų vertės skirtingoms grunto atmainoms.

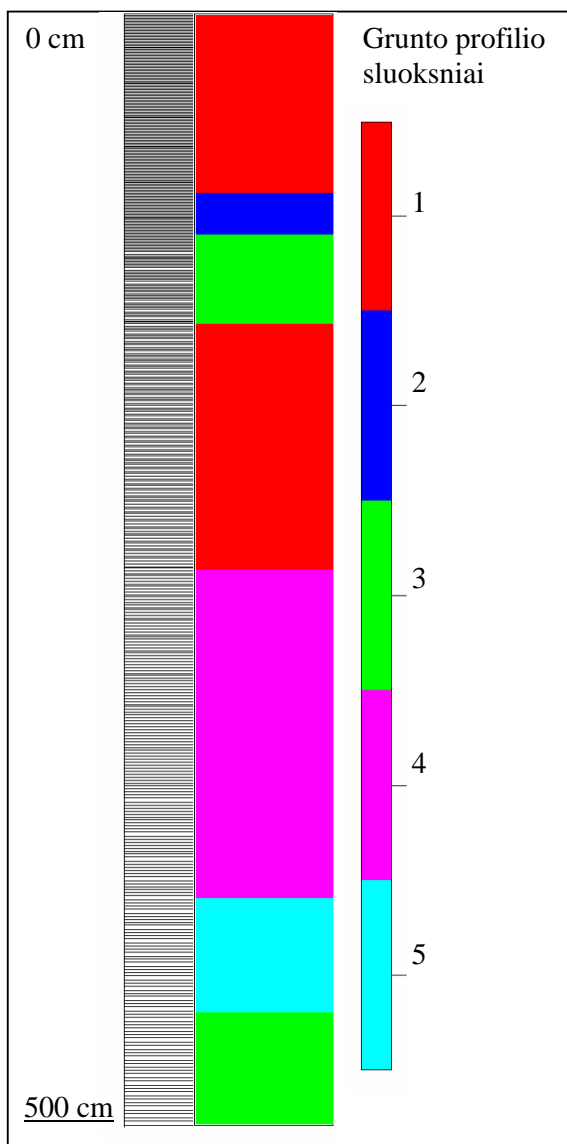
Medžiaga	θ_r (-)	θ_s (-)	α (1/cm)	n (-)	K_s (cm/para)	l (-)	Tankis (g/cm ³)
1	0,0049	0,3187	0,0277	4,1955	230,0	0,5	1,55
2	0,0039	0,3999	0,0450	2,1481	285,0	0,5	1,48
3	0,0043	0,4080	0,0414	2,6113	390,0	0,5	1,49
4	0,0035	0,3825	0,0476	1,8420	176,4	0,5	1,45
5	0,0046	0,4292	0,0065	1,6758	90,2	0,5	1,32

Tam, kad būtų įgyvendintas aeracijos zonos drėgmės ir priemaišų transporto lygčių skaitinis sprendimas, programoje HYDRUS yra naudojami baigtiniai elementai, todėl modeliavimo profilis turi būti suskirstytas į baigtinius elementus. Dėl konvertavimo problemų tinklelis turi būti sutankintas ten, kur gradientai yra didesni, todėl rekomenduojama aeracijos zonos profilio viršutinėje dalyje sudaryti tankesnį tinklelį, nes ten susidaro didesni gradientai. Maišiagalos aikštelės profilyje buvo sukurtas tinklelis iš 751 baigtinio elemento. Tinklelis viršutinėje dalyje suskirstytas į 0,01 cm elementus, o apatinėje dalyje – 1 cm (26 pav.).

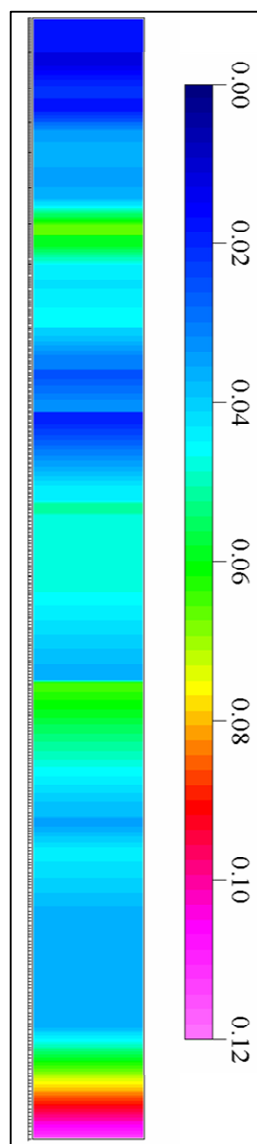
Pradinis grunto drėgnis buvo nustatytas laboratorijoje ir tokios jo vertės buvo panaudotos modelyje (27 pav.).

Viršutinė ir apatinė modelio ribinės sąlygos buvo apibrėžtos, kaip pastovaus spūdzio ribinės sąlygos: apatinė ribinė sąlyga priimta kaip pastovus

gruntinio vandens lygis, o viršutinė – kaip nuolat esančio žemės paviršiuje vandens stulpelio aukštis (slėgis).



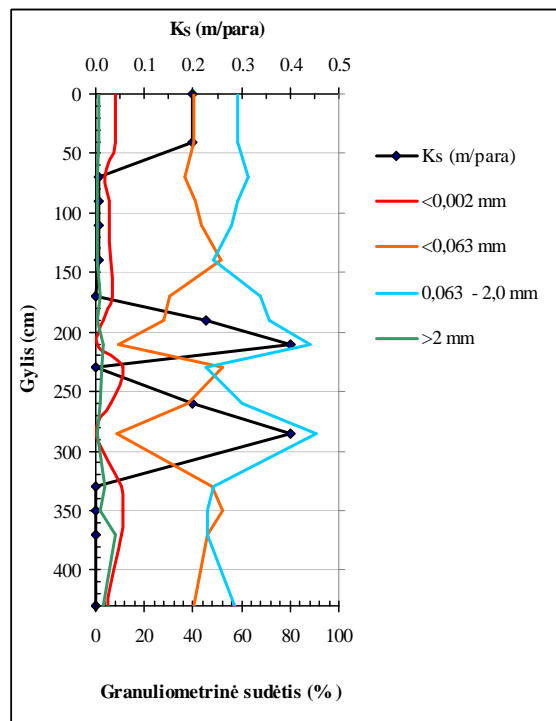
26 pav. Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos vienmačio modelio grunto sluoksniai ir baigtinių elementų tinklelio pasiskirstymas



27 pav. Pradinis grunto drėgnis (vnt.), priimtas Maišiagalos aikštelės modelyje pagal laboratorinių tyrimų duomenis

Stabatiškės aikštelės profilis

Palyginus su Maišagalos aikštelės didesnio storio aeracijos zonos grunto profiliu, Stabatiškės aikštelės mažesnio storio aeracijos zonos gruntai yra mažiau laidūs vandeniui. Čia išotinto grunto filtracijos koeficientas kinta nuo $1,3 \cdot 10^{-5}$ iki 0,4 m/para (28 pav.). Hidraulinis laidumas su gyliu gana kaitus (28 pav.), profilyje yra sluoksnių su mažai laidžiu ir laidžiu gruntu. Filtracijos koeficiento vertės yra mažesnės ten, kur gruntą sudaro smulkesnė frakcija. Filtracijos koeficientas (K_s) arti gruntinio vandens lygio (giliau nei 310 cm) yra 10000 kartų mažesnis negu arti žemės paviršiaus. Parametro K_s vertė 40 cm gylyje yra $5 \cdot 10^{-3}$ m/para, o 190 cm gylyje – 0,4 m/para. Po plono mažiau laidaus sluoksnio 210–230 cm intervale 265–285 cm gylyje K_s vertė vėl yra 0,4 m/para.



28 pav. Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos grunto filtracijos koeficiento (esant pilnam prisotinimui) ir granulimetrinės sudėties pasiskirstymas su gyliu.

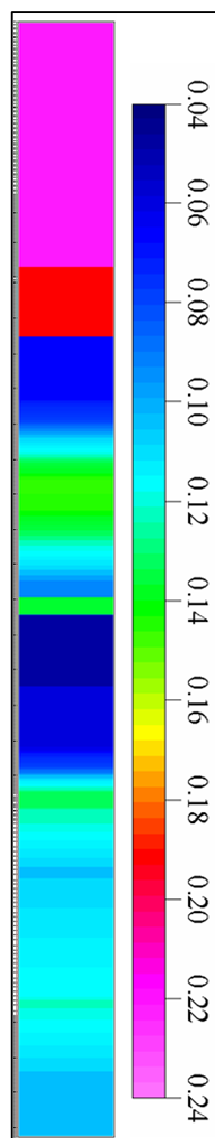
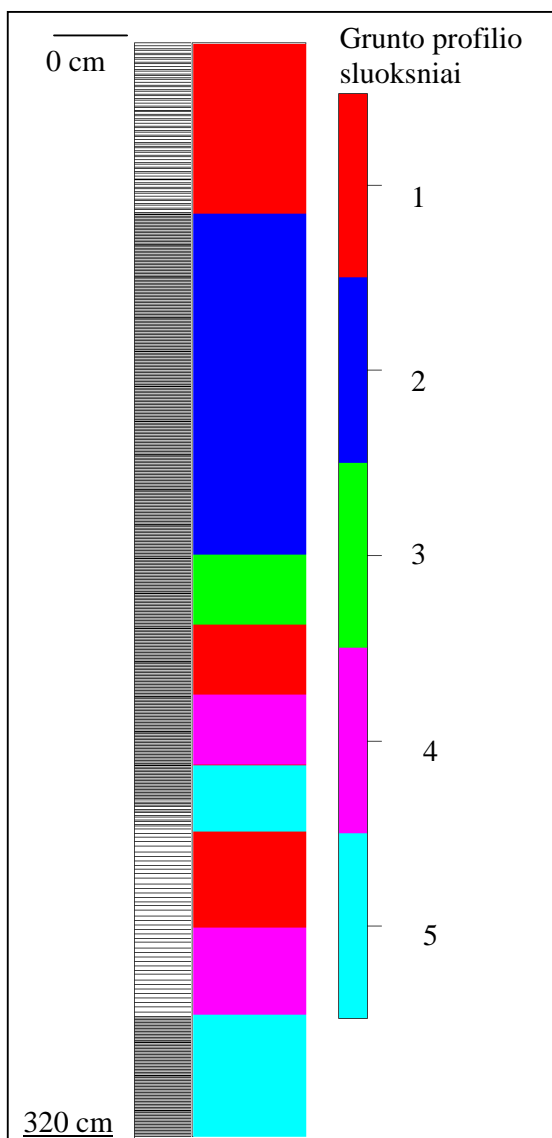
Profilį sudaro penkios grunto atmainos (8, 16 lentelė). Modelio sudarymui grunto profilis buvo padalintas į 9 sluoksnius, atsižvelgiant į filtracijos koeficiento kaitą ir granulimetrinę sudėtį. Modelio sluoksnių filtracijos koeficiento bei hidraulinių funkcijų koeficientų vertės pateiktos 16 lentelėje.

16 lentelė. Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos gruntų hidraulinių savybių ir funkcijų koeficientų vertės skirtingoms grunto atmainoms.

Medžiaga	θ_r (-)	θ_s (-)	α (1/cm)	n (-)	K_s (cm/para)	l (-)	Tankis (g/cm ³)
1	0,031	0,298	0,0604	1,3735	20	0,5	1,90
2	0,042	0,294	0,0363	1,1853	0,5	0,5	1,54
3	0,073	0,359	0,0106	1,3436	0,12	0,5	1,77
4	0,035	0,326	0,0510	1,5297	40	0,5	1,74
5	0,065	0,439	0,0051	1,6626	0,0001	0,5	1,97

Stabatiškės aikštelės modelio profilyje buvo sukurtas tinklelis iš 961 baigtinio elemento (29 pav.). Panašiai, kaip ir Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos modelyje, čia baigtiniai elementai išskirti tankiau tose vietose, kur dėl grunto hidraulinių savybių kaitos didesni slėgio gradientai. Pradinis grunto drėgnis buvo nustatytas laboratorijoje ir tokios jo vertės buvo panaudotos baigtinių elementų modelyje (30 pav.).

Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos modelyje viršutinė ir apatinė modelio ribinės sąlygos buvo apibrėžtos, kaip pastovaus spūdžio ribinės sąlygos: apatinė ribinė sąlyga priimta kaip pastovus gruntinio vandens lygis, o viršutinė – kaip esančio žemės paviršiuje vandens stulpelio aukštis (slėgis).



29 pav. Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos vienmačio modelio grunto sluoksniai (vnt.), ir baigtinių elementų tinklelio pasiskirstymas.

30 pav. Pradinis grunto drėgnis aikštelės modelyje pagal laboratorinių tyrimų duomenys.

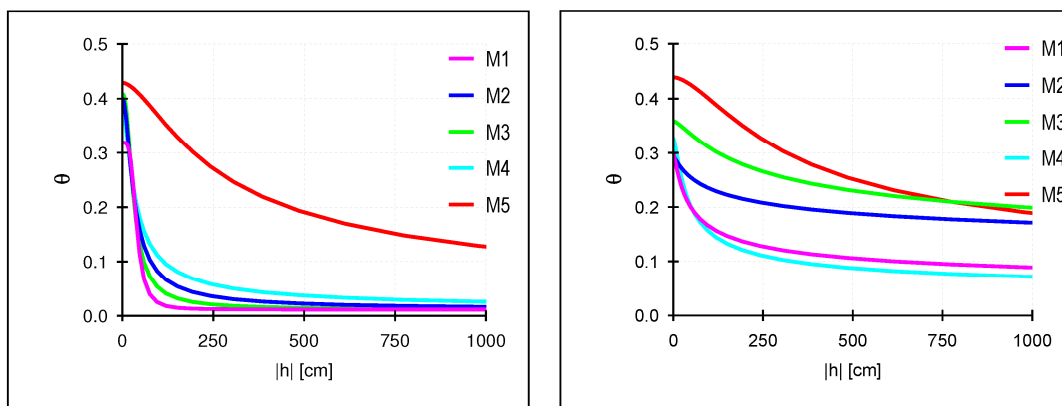
3.2.2. Modeliavimo pagal hipotetinius scenarijus rezultatai

Palyginus su abiem tyrimų objektais susijusius eksperimentinių tyrimų rezultatus, buvo sudaryti abiejų aikštelių aeracijos zonos modeliai. Išryškėjus abiejų aikštelių grunto hidraulinių savybių dideliame skirtume, pasirinkta

skirtinga modelių laiko skalė: Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos modeliui – 10 dienų, Stabatiškės – 1000 dienų. Drėgmės pasiskirstymo ir priemaišų pernašos modeliavimo rezultatai detaliai pateikti, palyginant dviejų aikštelių profilius.

Grunto hidraulinės savybės aeracijos zonos modeliuose

Atsižvelgiant į grunto drėgnio ir išsiurbiamojo slėgio funkciją, abiejų aikštelių aeracijos zonos modeliuose buvo palygintos grunto 5 skirtingų medžiagų (nuo M1 iki M5) (15 ir 16 lentelės) hidraulinės savybės (31 pav.).



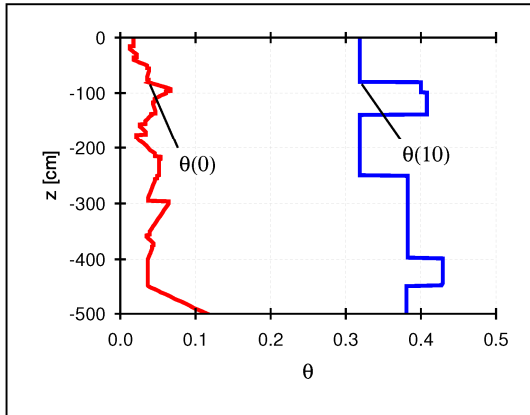
Maišiagalos aikštelės profilis

Stabatiškės aikštelės profilis

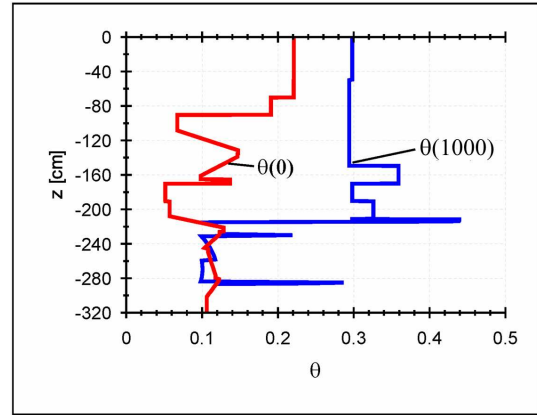
31 pav. Išsiurbiamojo slėgio ir grunto drėgnio sąryšis.

M5 sluoksnių gruntas yra mažiausiai laidus abiejuose profiliuose. Kadangi grunto laidumas Maišiagalos aikštelės profilyje yra daug didesnis nei Stabatiškės aikštelės profilyje, tai Maišiagalos aikštelės profilyje gruntai įsisotina vandeniu labai greitai, palyginus su Stabatiškės aikštele.

Esant žemam vandens lygiui žemės paviršiuje (slėgis priimtas lygus 1 cm), sumodeliuoto grunto drėgnio pasiskirstymas abiejuose profiliuose pateiktas 32 pav.



Maišiagalos aikštelės profilis



Stabatiškės aikštelės profilis

32 pav. Pradinis $\theta(0)$ ir sumodeliuotas vandens drėgnis ($t=10$ dienų Maišiagalos profilis, $t=1000$ dienų Stabatiškės profilis).

Aeracijos zonos gruntas Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos modelyje pasiekia soties drėgnį per keletą dienų ($t=10$ dienų). Net esant priimtam 1 cm slėgiui, grunto drėgnis tampa lygus grunto sluoksnių drėgmės imlumui (14 lentelė).

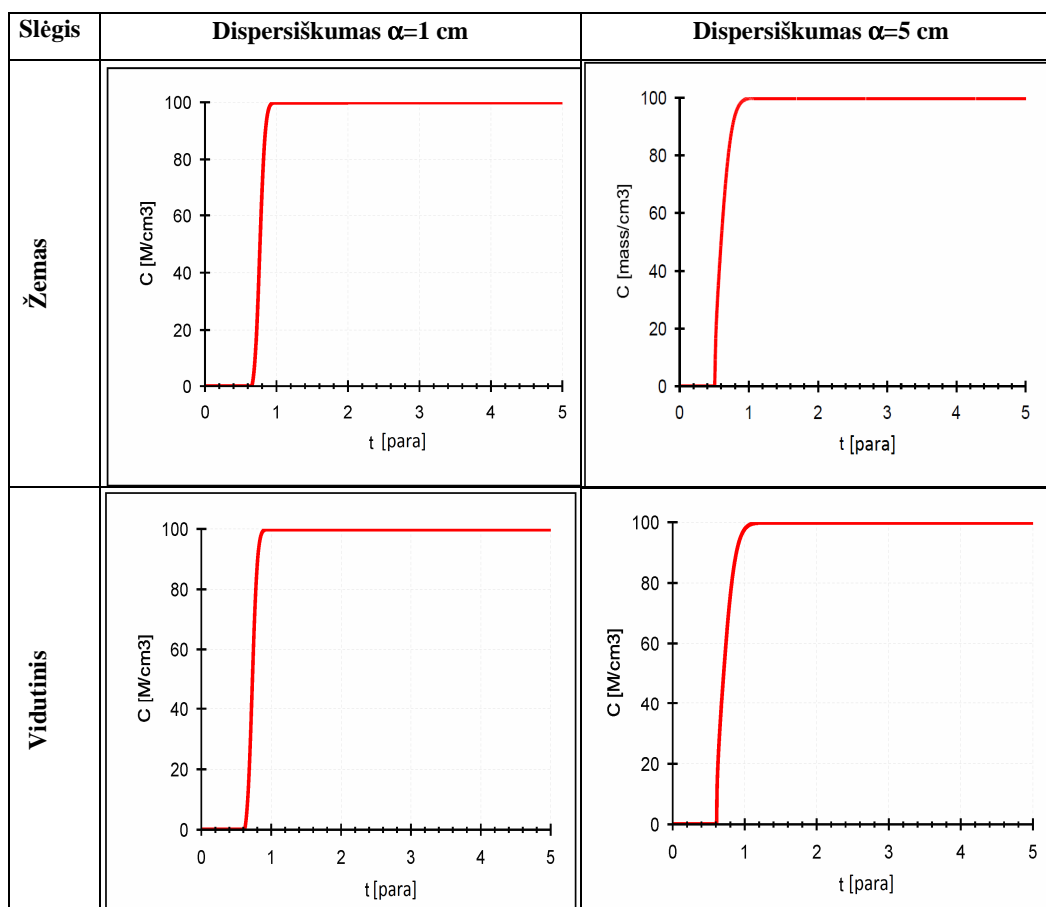
Kitokie rezultatai gauti Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos modeliu. Mažai laidus sluoksnis (M5) stabdo vandens judėjimą žemyn ir sukuria barjerą 210 cm gylyje. Virš šio sluoksnio gruntas išsotina vandeniu, tačiau per minėtą barjerą vanduo labai lėtai sunkiasi, todėl žemiau esantys grunto sluoksniai lieka neišsotinti netgi po 1000 dienų (32 pav.).

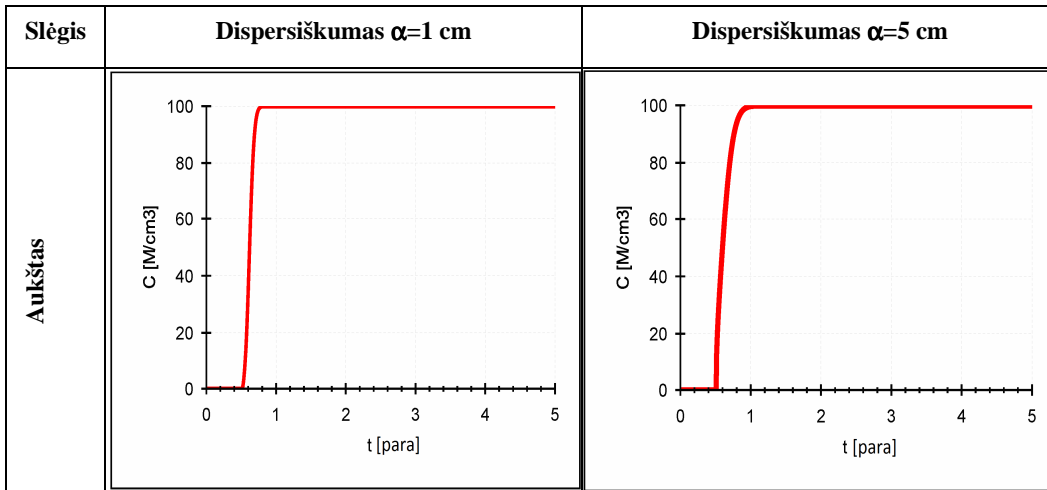
3.2.3. Hipotetinių priemaišų koncentracijos pasiskirstymas aeracijos zonos profiliuose

Priemaišų koncentracijos pasiskirstymas aeracijos zonos profiliuose buvo modeliuotas, priėmus nuolatinį ir momentinį priemaišų įvedimą trejopoms (žemo, vidutinio ir aukšto vandens slėgio) sąlygomis. Siekiant nustatyti dispersiškumo poveikį rezultatams, modelyje naudotos dvi dispersiškumo (α) vertės ($\alpha=1$ cm ir $\alpha=5$ cm).

Maišiagalos aikštelės profilis

Priėmus nuolatinį priemaišų įvedimą, jų koncentracijos pasiskirstymas aeracijos zonos profilio apačioje (ties gruntinio vandens lygiu) pateiktas 33 pav.



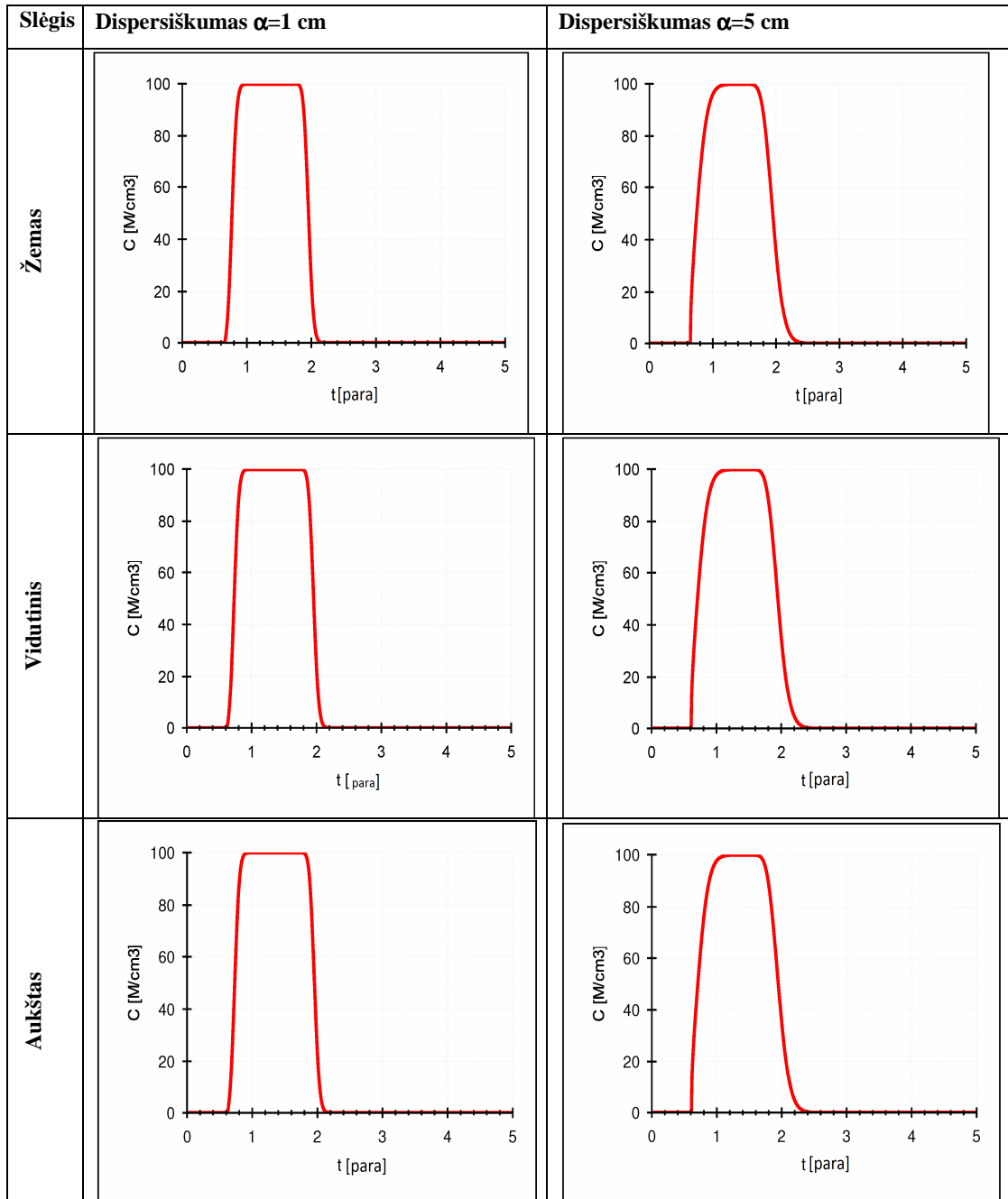


33 pav. Priemaišų koncentracijos ties apatine modelio riba kaita laiko bėgyje Maišiagalos aikštelės modelyje, priėmus nuolatinį priemaišų įvedimą, trejopas vandens slėgio sąlygas ir skirtingą dispersiškumą ($\alpha=1$ cm ir $=5$ cm).

Priemaišos pernešamos per aeracijos zoną per 14 valandų, esant žemam ir vidutiniam slėgiui, ir per 12 valandų – esant aukštam slėgiui. Taigi, priemaišų koncentracija pasiekia 100 % santykinį dydį per mažiau negu 24 valandas, esant visoms nagrinėtoms ribinėms sąlygoms. Kadangi dėl aukšto laidumo grunto priemaišų pernašoje dominuojantis procesas yra advekcinis transportas, tai dispersiškumo įtaka priemaišų koncentracijos pasiskirstymui yra nereikšminga.

Priėmus momentinį (1 paros trukmės) priemaišų įvedimą trejopoms (žemo, vidutinio ir aukšto vandens slėgio) sąlygomis, jų koncentracijos pasiskirstymas aeracijos zonos profilio apačioje (ties gruntinio vandens lygiu) pateiktas 34 pav.

Kadangi Maišiagalos aikštelės modelyje vandens ir priemaišų pernaša labai greita, tai priemaišų judėjimo profilyje iki apatinės modelio ribos laikas yra panašus (nuo 12 iki 14 valandų) į gautą, esant pastoviam priemaišų įvedimui. Sustabdžius įvedimą, priemaišos iš neprisotintos zonos visiškai pasišalina per 2–2,5 paras. Šiuo atveju irgi dominuoja advekcinis medžiagos pernešimas, o dispersiškumo įtaka nėra reikšminga.

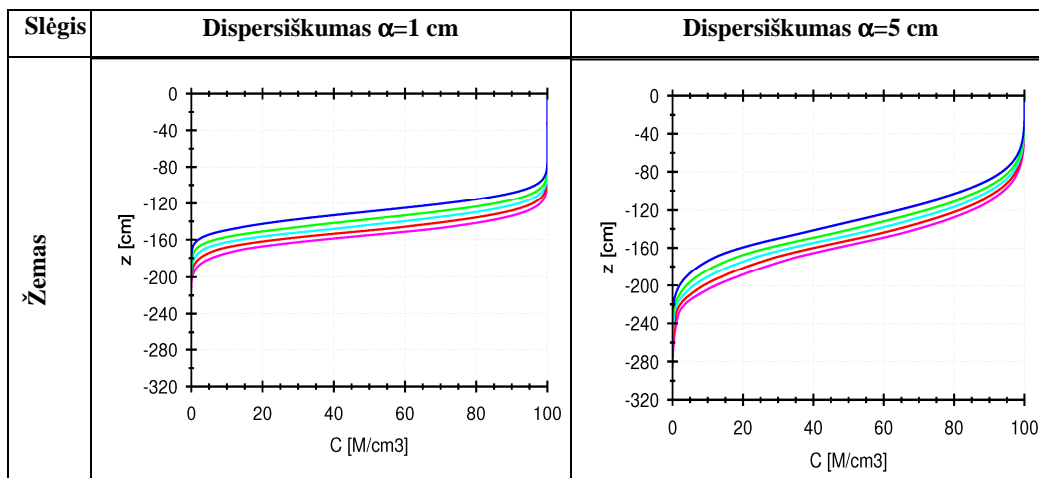


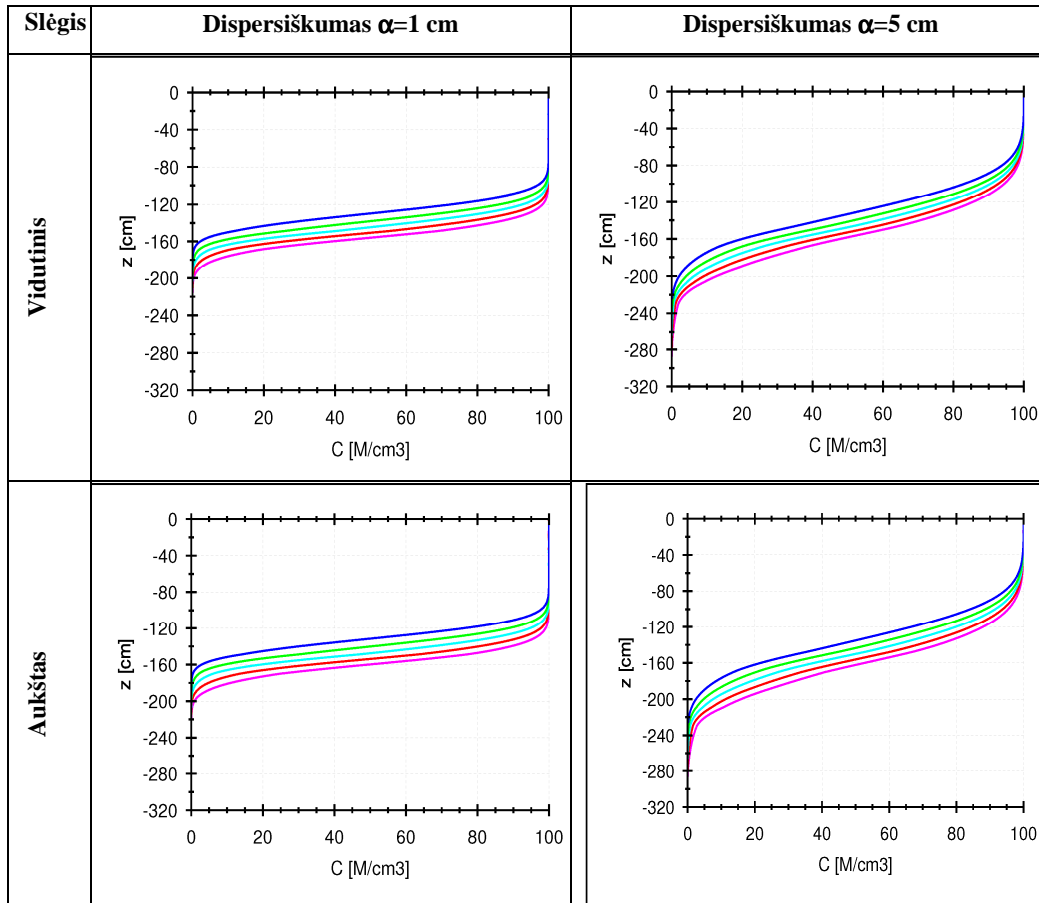
34 pav. Priemaišų koncentracijos ties apatine modelio riba kaita laiko bėgyje Maišiagalos aikštelės modelyje, priėmus momentinį priemaišų įvedimą, trejopas vandens slėgio sąlygas ir skirtingą dispersiškumą ($\alpha=1$ cm ir $\alpha=5$ cm).

Stabatiškės aikštelės profilis

Drėgmės ir priemaišų pernašą Stabatiškės aikštelės aeracijos zonoje labiausiai įtakoja mažo laidumo gruntas su $K_s=0,0001$ cm/para (14 lentelė), kuris yra paplitęs 210–230 cm ir 285–320 cm gylyje. Gerokai didesnis grunto laidumas yra virš minėtų sluoksnių, ir priemaišos gali greitai pasiekti pirmą iš šių sluoksnių, tačiau labai lėtai juda per šiuos sluoksnius ir nepasiekia gruntinio vandens sluoksnio net ir po 1000 dienų. Esant tokiems lėtiems procesams, priemaišų pernašą iki aeracijos zonos apačios geriau iliustruoja priemaišų koncentracijos – gylio profiliai, o ne koncentracijos – laiko priklausomybės .

Priėmus nuolatinį priemaišų įvedimą trejopoms (žemo, vidutinio ir aukšto vandens slėgio) sąlygomis, jų koncentracijos pasiskirstymas su aeracijos zonos profilio gyliu skirtingiems laiko momentams ir skirtingoms dispersiškumo ($\alpha=1$ cm ir $\alpha=5$ cm) vertėms pateiktas 35 pav.

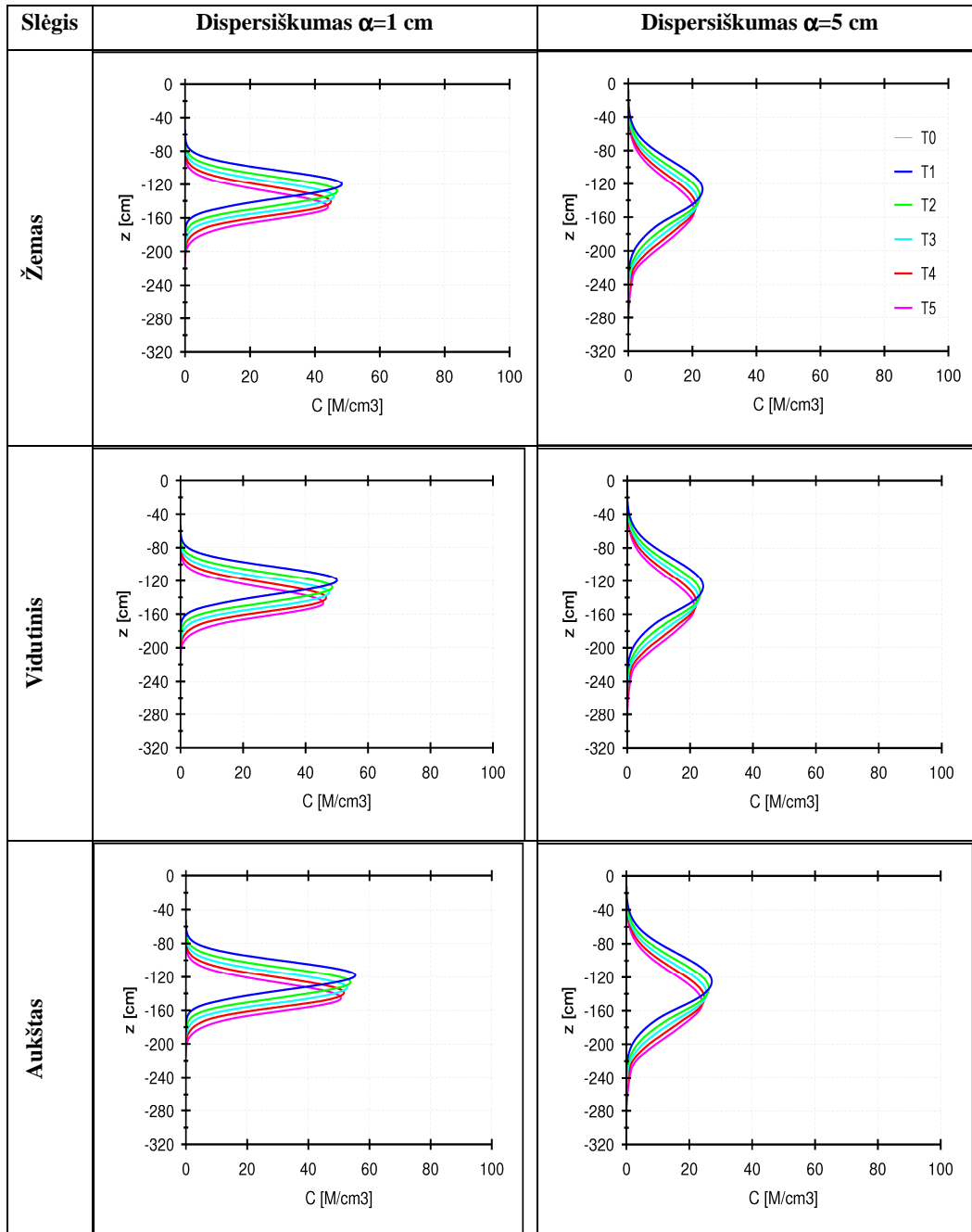




35 pav. Priemaišų koncentracijos kaita su gyliu skirtingais laiko momentais Stabatiškės aikštelės modelyje, priėmus nuolatinį priemaišų įvedimą, trejopas vandens slėgio sąlygas ir skirtingą dispersiškumą ($\alpha=1$ cm ir $\alpha=5$ cm) (mėlyna spalva: $t=200$ parų, žalia: $t=400$ parų, mėlna: $t=600$ parų, raudona: $t=800$ parų, violetinė: $t=1000$ parų).

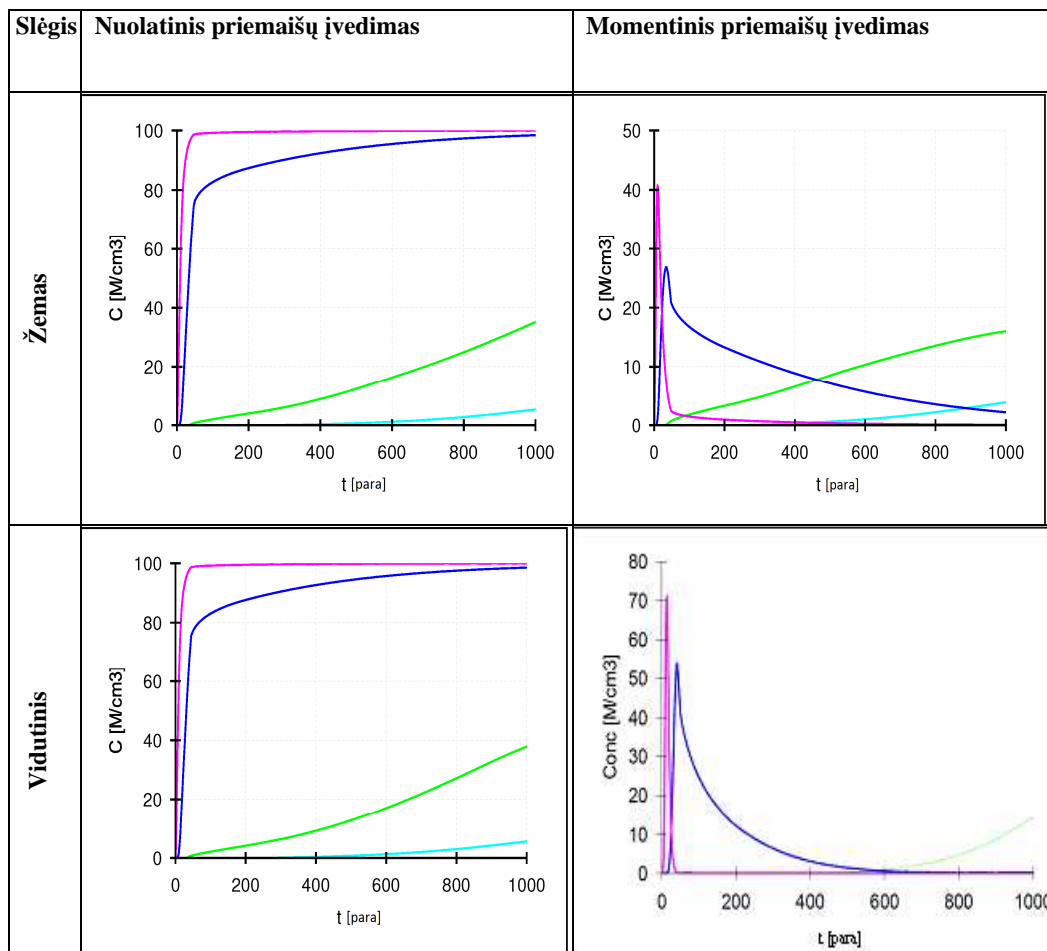
Kreivių spalva parodo priemaišų koncentracijos pasiskirstymą kas 200 dienų. Palyginus greitai priemaišų frontas pasiekia viršutinį mažo laidumo sluoksnį 210 – 230 cm gylyje. Tačiau tik labai maža priemaišų dalis juda gilyn (35 pav.). Lyginant su Maišiagalos aikštelės profiliu, čia priemaišų pernašos trukmė daug ilgesnė.

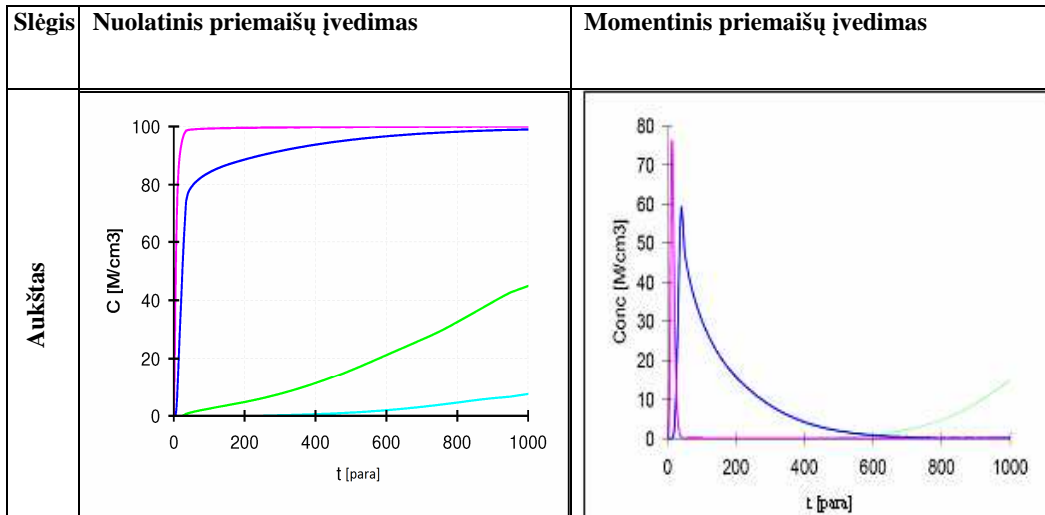
Priėmus momentinį (1 paros trukmės) priemaišų įvedimą trejopoms (žemo, vidutinio ir aukšto vandens slėgio) sąlygomis, jų koncentracijos pasiskirstymas Stabatiškės aikštelės aeracijos zonoje su gyliu pateiktas 36 pav.



36 pav. Priemaišų koncentracijos kaita su gyliu skirtingais laiko momentais Stabatiškės aikštelės modelyje, priėmus momentinį priemaišų įvedimą, trejopas vandens slėgio sąlygas ir skirtingą dispersiškumą ($\alpha=1$ cm ir $\alpha=5$ cm) (mėlyna spalva: $t=200$ parų, žalia: $t=400$ parų, mėlsva: $t=600$ parų, raudona: $t=800$ parų, violetinė: $t=1000$ parų).

Ir šiuo atveju, kaip ir esant nuolatiniam priemaišų įvedimui, kaip barjeras veikia 210 – 230 cm gylyje esantis mažai laidaus grunto sluoksnis, o priemaišų koncentracijos smailė žemyn beveik nejuda, tačiau čia pasireiškia dispersiškumo įtaka. Priemaišų koncentracijos pasiskirstymas tam tikrame gylyje ($z=50$, $z=100$, $z=200$, $z=250$, $z=300$ cm) laiko bėgyje, esant nuolatiniam ir momentiniam priemaišų įvedimui, yra pateiktas 37 pav.





37 pav. Priemaišų koncentracijos kaita laiko bėgyje skirtingame gylyje Stabatiškės aikštelės modelyje, priėmus nuolatinį ir momentinį priemaišų įvedimą bei trejopas vandens slėgio sąlygas ($z=50$ cm (violetinė), $z=100$ cm (mėlyna), $z=200$ cm (žalia), $z=250$ cm (melsva), $z=300$ cm) ($\alpha=5$ cm).

Pagal Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos modelio rezultatus 10 % priemaišų pasiekia 50 cm gylį per 2 dienas, 100 cm – per 11 dienų, 200 cm – per 370 dienų; 10% priemaišų nepasiekia 250 cm gylio net praėjus 1000 dienų; priemaišos per modelyje užduotą laiką nepasiekia 300 cm gylio. Pernašos laikas iki modeliuotų gylių yra panašus, esant visoms sąlygoms – nuolatiniam ir momentiniam priemaišų įvedimui, trejopoms slėgio sąlygoms.

Esant identiškiems scenarijams, kuriuose buvo priimtos tirtų aikštelių žemės paviršiaus užtvindymo sąlygos, modeliavimo metų nustatyti skirtingi drėgmės ir priemaišų pernašos aeracijos zonos grunte ypatumai. Modelių pagrindimui panaudoti su abejomis aikštelėmis susijusių eksperimentinių tyrimų ir stebėjimų laboratorijoje ir *in situ* rezultatai.

Modeliavimo pagal hipotetinius scenarijus rezultatų apibendrinimas

Priėmus hipotetines žemės paviršiaus užtvindymo sąlygas su pastoviu trejopu vandens slėgiu (žemu, vidutiniu ir aukštu) (12 lentelė), dėl grunto gerokai didesnio laidumo vandeniui ir kitų palankių hidraulinių savybių,

drėgmės pernaša ir priemaišų advekcija Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos profilyje yra daug greitesnė, lyginant su Stabatiškės aikštelės atveju.

Stabatiškės aikštelės aeracijos zonoje yra bent du reikšmingi mažai laidaus grunto sluoksniai, kurie labai sulėtina drėgmės ir priemaišų pernašą profiliu žemyn iki gruntinio vandens paviršiaus. Atsižvelgiant į didelį abiejų profilių hidraulinių savybių skirtumą, priemaišų pernašos iki modelio apatinės ribos laikotarpis Maišiagalos aikštelės profiliui yra trumpas, o Stabatiškės – ilgas. Pastarajame profilyje 210–230 cm gylyje yra mažai laidus sluoksnis, kuris veikia kaip drėgmės ir priemaišų pernašos barjeras. Todėl priemaišų pernašos laikas iki gruntinio vandens paviršiaus siektų >35 metus, net ir esant nuolatiniam priemaišų įvedimui.

3.3. Tričio pernašos aeracijos zonoje modelis

Naudojant drėgmės ir priemaišų pernašos aeracijos zonoje modeliavimo programą HYDRUS-1, buvo sumodeliuotas tričio koncentracijos pasiskirstymas Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos profilyje. Sumodeliuotas ^3H pasiskirstymo grunto drėgmėje profilis palygintas su eksperimentinių tyrimų rezultatais. Aeracijos zonos grunto profilio bandiniai ^3H tyrimams buvo paimti 2010 metų lapkričio mėn. Sudarant modelį ^3H koncentracija yra įvedama į aeracijos zoną kartu su krituliais. Siekiant išvengti pradinių sąlygų įtakos modelinėms ^3H koncentracijos grunte vertėms 2010 metais, ^3H pernašos modeliavimo laikotarpis priimtas nuo 2009 spalio pradžios iki 2010 gruodžio pabaigos. Izotopinė profilio sudėtis aeracijos zonoje formuojasi išfiltravus krituliams ir jiems judant iki gruntinio vandens per aeracijos zoną. Vandens apykaitos laikas Maišiagalos aikštelės aeracijos zonoje palyginus trumpas. Todėl atkuriant ^3H profilį tam tikram momentui, pakanka tik kelių metų (iki skaičiuojamo momento) trukmės įeities duomenų (krituliai, garavimas, ^3H kiekis krituliuose). Pagrindiniai ^3H pernašos modelio įeities parametrai yra ^3H aktyvumo koncentracija krituliuose, kritulių intensyvumas ir potencialus garavimas (17 lentelė).

17 lentelė. Tričio pernašos Maišiagalos aikštelės aeracijos zonoje modelio įeities parametrai (2009 spalio mėn. – 2010 gruodžio mėn.).

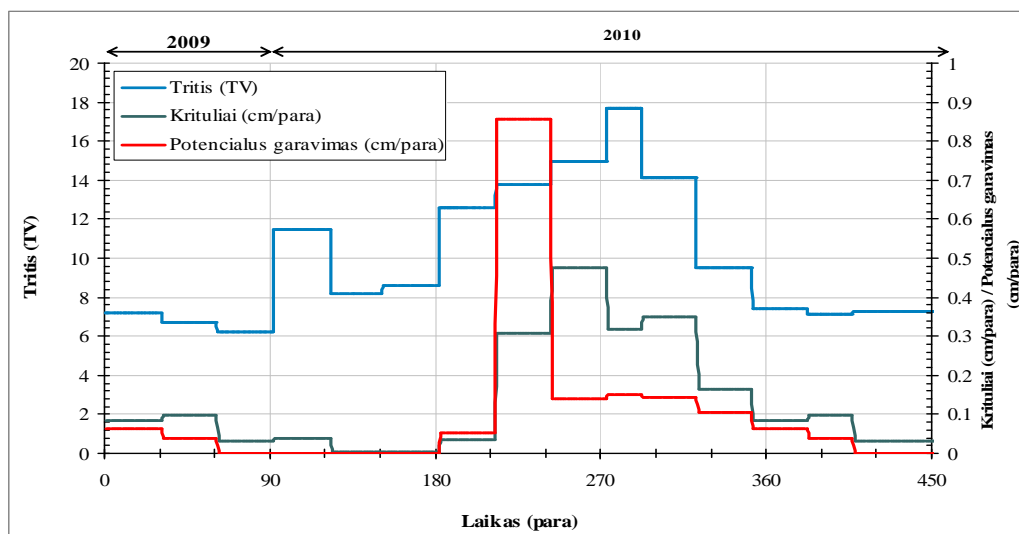
Laikas (para)	Krituliai (cm/para)	Potencialus garavimas (cm/para)	³ H koncentracija krituliuose (TV)
31	0,084	0,062	7,2
61	0,098	0,037	6,7
92	0,033	0	6,2
123	0,039	0	11,5
151	0,002	0	8,2
182	0,005	0	8,6
212	0,034	0,053	12,6
243	0,308	0,857	13,8
273	0,477	0,140	15,0
292	0,318	0,150	17,7
322	0,350	0,143	14,1
352	0,163	0,105	9,5
382	0,084	0,062	7,4
407	0,098	0,037	7,1
457	0,033	0	7,3

Modelyje naudojamos įeities dydžių paros vertės. Tačiau nėra duomenų apie ³H koncentraciją kiekvienos paros krituliuose, nes kaupiami duomenys apie ³H koncentraciją tik mėnesio krituliuose. ³H koncentracija mėnesio krituliuose nenutrūkstamai matuojama Zarasų rajone, kuris yra apie 140 km atstumu nuo modeliuojamo objekto. Mėnesio potencialus garavimas buvo apskaičiuotas pagal Thornthwaite metodą (Thornthwaite, 1948).

Siekiant sudaryti kiekvienos paros įeities duomenis modeliui, mėnesinių parametrų vertės buvo dalijamos iš mėnesio parų skaičiaus, darant prielaidą, kad mėnesio bėgyje kiekvienos paros sąlygos yra vienodos.

³H įeities srautas (TV/cm²/para) yra susietas su infiltracija, esant prielaidai, kad infiltracija ir ³H srautas kiekvieną mėnesio parą yra pastovus. Ši prielaida išlygina įeities parametrus ir neleidžia užfiksuoti epizodinių įvykių įtakos, kuri galėjo būti daug reikšmingesnė kuriomis nors mėnesio paromis. Tokia prielaida gali būti pagrįsta garavimo atžvilgiu, bet kritulių įeities

sulyginimas mėnesio laikotarpiui neleidžia sumodeliuoti ekstreminių ^3H koncentracijos verčių. ^3H ir kiti įeities parametrai yra pateikti 38 paveiksle.



38 pav. Tričio įeities funkcija (tūrinis aktyvumas mėnesio krituliuose Rytų Lietuvoje, Zarasai, GTC RTL duomenys) ir meteorologiniai parametrai (krituliai ir potencialus išgaravimas Maišiagalos aikštelėje pagal RATA meteostoties duomenis).

Modeliavimo laikotarpiui Maišiagalos aikštelėje ^3H koncentracija krituliuose svyruoja nuo 6,2 iki 17,7 TV ir yra mažiausia spalio – sausio mėn., didžiausia – vasaros mėnesiais. Maišiagalos aikštelėje kritulių duomenys ir kiti meteorologiniai parametrai kaupiami nuo 2010 metų, todėl 2010 metų spalio – gruodžio duomenys buvo panaudoti ir 2009 metams. Maksimalus potencialus garavimas nustatytas 2010 gegužės mėnesiui. Labiausiai lietingas periodas 2010 metais buvo gegužį ir rugsėjį.

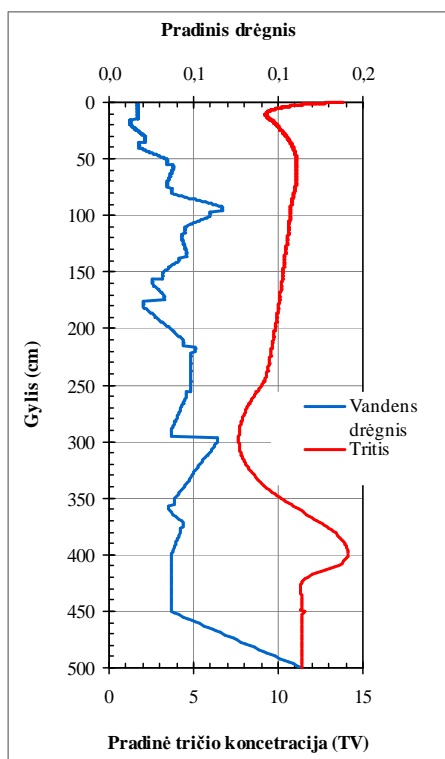
Pradinės sąlygos

Pradinės ^3H koncentracijos pasiskirstymas aeracijos zonoje buvo generuojamas, naudojant ^3H koncentracijos krituliuose vertes 2009 metais ir atliekant keletą skaičiavimų žingsnių. Iš pradžių skaičiuota 2009 metų spalio 1 d. – gruodžio 31 d. laikotarpiui (trys mėnesiai), esant 7 TV pradinei sąlygai.

Sumodeliuotos ^3H koncentracijos vertės profilyje toliau buvo naudojamos kaip ^3H įeities duomenys. Po to modeliniai skaičiavimai buvo kartojami kelis kartus, kol skirtumas tarp nustatytų verčių nuosekliai atliktuose skaičiavimo žingsniuose tapo nedidelis. Sumodeliuotas pradinis ^3H pasiskirstymas profilyje pateiktas 42 pav.

Kadangi nuo modeliavimo pradžios momento iki 2010 m. lapkričio mėn., kai buvo imami aeracijos zonos grunto mėginiai, buvo pakankamai ilgas laikotarpis, o ^3H transporto laikas yra palyginus trumpas, tokiu būdu nustatytos pradinės sąlygos neturėjo įtakos 2010 metų ^3H koncentracijos vertėms.

Pradinis drėgnio pasiskirstymas grunto profilyje (39 pav.) buvo atkurtas modelio pagalba panašiai, kaip ^3H pradinė koncentracija. Iš pradžių skaičiuotas grunto drėgnio pasiskirstymas pagal 2009 metų spalio 1 d. – gruodžio 31 d. laikotarpio kritulių duomenis. 2009 metų pabaigai suskaičiuotas grunto drėgnis buvo naudojamas, kaip aeracijos zonos pradinis drėgnis.



39 pav. Modeliavimo metodu nustatytas pradinis grunto drėgnis ir pradinė tričio koncentracija aeracijos zonos grunto drėgmėje 2009 m. spalio mėn.

Kadangi pradinės sąlygos buvo atkurtos skaitinio modelio pagalba, tai 2010 metų pirmųjų mėnesių vertės gali neatitikti tikrovės. Tačiau vandens apykaitos laikas aeracijos zonoje yra gana trumpas, todėl pradinių sąlygų poveikis yra pašalinamas iki 2010 spalio mėn.

Modelio ribinės sąlygos

^3H pernašos modelio geometrija, apimant grunto profilio vertikalu suskirstymą, ir grunto hidraulinės savybės yra tokios pačios, kaip modeliuojant drėgmės ir priemaišų pernašą Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos profilyje pagal hipotetinį scenarijų.

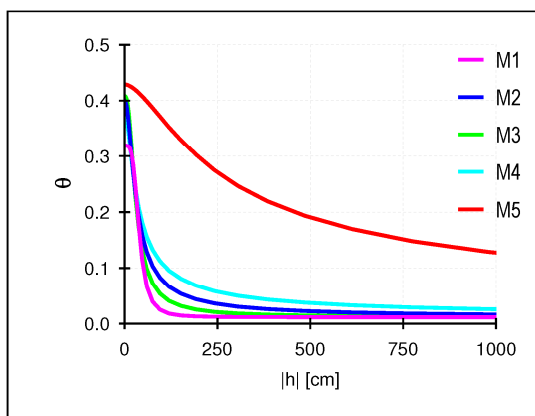
Šiame ^3H pernašos modelyje viršutinė ribinė sąlyga realizuojama kaip laike kintanti ribinė sąlyga („Time-variable BC“) vietoje vandens slėgio (pressure head) žemės paviršiuje, kaip buvo ankstesniame modelyje. HYDRUS-1 programoje, naudojant laike kintančią ribinę sąlygą, reikia nustatyti laiko intervalus, kai keičiasi įeities parametrai (kritulių kiekio, potencialaus garavimo ir ^3H koncentracijos krituliuose vertės) viršutinėje modelio riboje (38 pav.). Modeliavimo periodas apima 15 mėnesių. Apatinė ribinė sąlyga priimta kaip laisvo drenažo ribinė sąlyga („Free Drainage BC“). Esant šiai sąlygai, gruntinio vandens lygis išlieka pastovus per visą modeliavimo laikotarpį, o ^3H pasiekia įsotintą zoną ir juda vandeningame sluoksnyje, nesikeičiant ^3H koncentracijos gradientui tarp įsotintos ir aeracijos zonų.

Modelio parametrai

Pagrindiniai ^3H pernašos aeracijos zonoje modelio parametrai yra hidrauliniai parametrai: liekaninis drėgnis (θ_r), soties drėgnis (θ_s), prisotinto grunto filtracijos koeficientas (K_s) ir aeracijos zonos grunto hidraulinės (drėgmės sulaikymo ir drėgmės laidumo) funkcijos. Kaip ir modeliuojant drėgmės ir priemaišų pernašą Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos profilyje pagal hipotetinį scenarijų, ^3H pernašos aeracijos zonoje modelyje hidraulinių

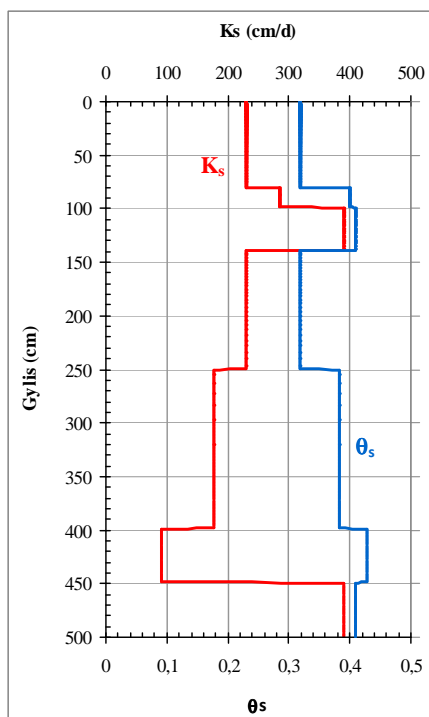
funkcijų (laidumo priklausomybės nuo išsiurbiamojo slėgio ir grunto drėgnio ir kt.) nustatymui buvo naudojamas Van Genuchten-Muallema modelis.

Atsižvelgiant į grunto drėgnio ir išsiurbiamojo slėgio sąryšį, ^3H pernašos aeracijos zonoje modelyje buvo palygintos grunto 5 skirtingos medžiagos (nuo M1 iki M5) (40 pav.).



40 pav. Išsiurbiamojo slėgio ir grunto drėgnio sąryšis Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos grunto skirtingoms atmainoms (medžiagoms).

Čia hidrauliniai parametrai buvo tokie patys, kaip ir modeliuojant drėgmės ir priemaišų pernašą Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos profilyje pagal hipotetinį scenarijų (14 lentelė). Mažiausia K_s vertė yra 90 cm/para. Ši vertė apibūdina palyginus didelį grunto hidraulinį laidumą. 41 pav. pateiktas išotinto grunto filtracijos koeficiento ir soties drėgnio pasiskirstymas.



41 pav. Įsotinto grunto filtracijos koeficiento (K_s (cm/para)) ir soties drėgnio (θ_s) pasiskirstymas Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos grunto profilyje.

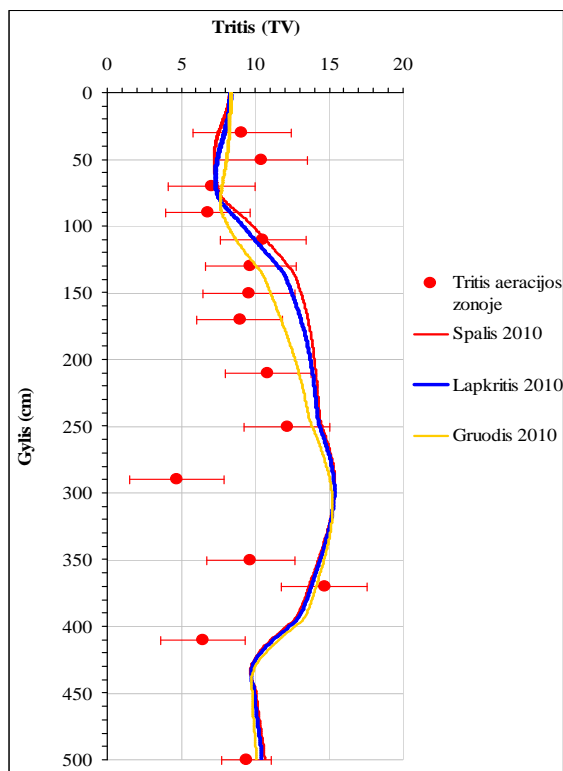
Rezultatai

Keliems momentams sumodeliuotas ir išmatuotas ^3H koncentracijos pasiskirstymas Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos grunto profilyje pateiktas 42 pav.

Palyginus modeliavimo ir eksperimento rezultatus, matyti, jog sumodeliuotos ^3H koncentracijos vertės pasiskirsto labiau vienalytiškai negu išmatuotos eksperimentiškai. Mažiausia išmatuota ^3H koncentracijos grunto drėgmėje vertė modelyje nebuvo atkurta.

Pagal matavimų rezultatus ^3H koncentracija aeracijos zonos grunto profilio drėgmėje svyruoja nuo 4,7 iki 14,7 TV (11 lentelė). Mažiausia vertė ($4,7 \pm 3,2$ TV) būdinga 280 – 300 cm gylyje esančiai grunto drėgmei. Mažesniame ir didesniame gylyje ^3H koncentracija grunto drėgmėje yra gerokai didesnė. Tokį kontrastingą ^3H koncentracijos pasiskirstymą galima būtų paaiškinti mažo laidumo sluoksnio buvimu ir ilgesniu drėgmės apykaitos laiku šiame intervale. Tačiau tokio mažo laidumo sluoksnio nėra, šis sluoksnis

nesiskiria nuo kitų hidraulinio laidumo vertėmis. Kadangi vandens apykaitos laikas aeracijos zonoje yra pakankamai trumpas, ^3H koncentracija dėl jo radioaktyvaus skilimo negali tiek sumažėti, kad pasiektų tokį dydį.



42 pav. Keliems momentams sumodeliuotas ir vieną kartą išmatuotas (2010 m. lapkričio mėn.) tričio koncentracijos pasiskirstymas Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos grunto profilyje.

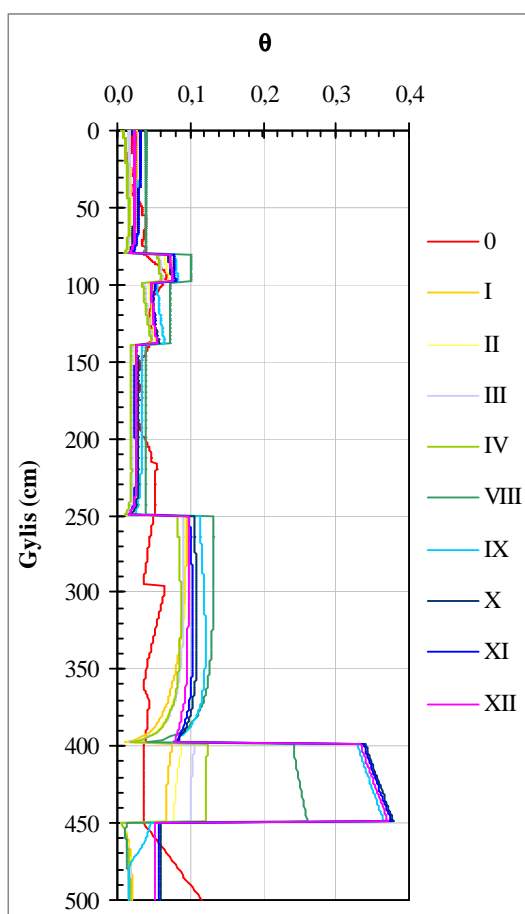
Išskyrus matavimų rezultatų neapibrėžtį (matuojant ^3H aktyvumą be praturtinimo, neapibrėžtis gali būti reikšminga), tokia maža ^3H koncentracija grunto drėgmėje šiame gylyje gali būti kritulių infiltracijos su maža ^3H koncentracija pasekmė. ^3H koncentracija krituliuose išmatuota suminiuose mėnesio krituliuose, todėl neatspindi atskirų trumpalaikių (paros) įvykių. Kadangi daroma prielaida apie įeities parametrų pastovumą atskiro mėnesio bėgyje, tai modelyje nebuvo atkurta mažiausia ^3H koncentracija.

Apskritai, modeliavimo rezultatai atitinka ^3H koncentracijos išmatuotas vertes pakankamai gerai, išskyrus mažiausią ^3H koncentracijos vertę 280–300

cm gylyje. Esant trumpam drėgmės apykaitos laikui, tričio modelis yra jautrus ^3H įeities funkcijai.

Modelyje (42 pav.) atkurti ^3H koncentracijos profiliai aeracijos zonoje 2010 m. spalio, lapkričio ir gruodžio mėnesiais. Nors sudarytas modelis reprezentuoja patenkinamai vandens ir priemaišų transportą aeracijos zonoje, siekiant geresnio modeliavimo ir eksperimento rezultatų sutapimo galima būtų naudoti ^3H įeities funkcijos paros duomenis, matuojant ^3H koncentraciją krituliuose arčiau tiriamo objekto.

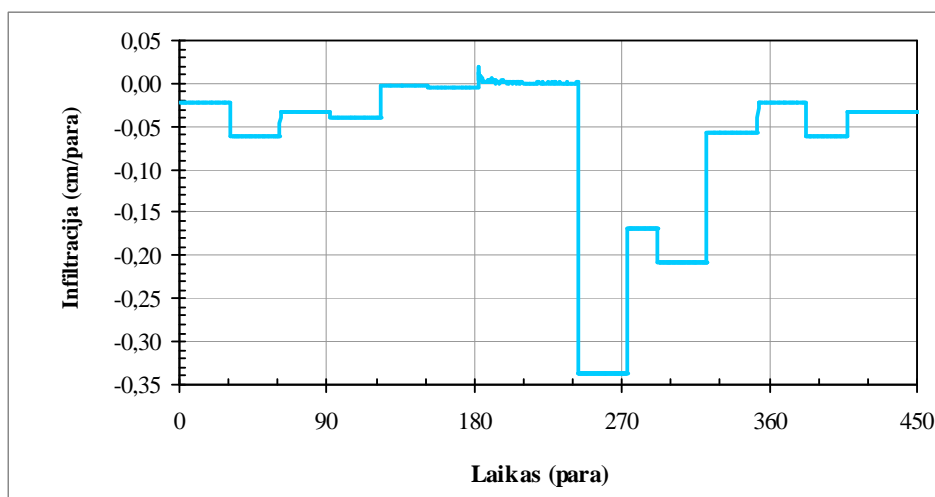
Modeliavimo metodais, greta ^3H koncentracijos pasiskirstymo, buvo atkurti drėgmės pasiskirstymo ir balanso parametrai. Aeracijos zonos grunto drėgnio kaita profilyje 2010 metų laikotarpiui pateikta 43 pav.



43 pav. 2010 m. skirtingiems mėnesiams sumodeliuotas grunto drėgnis Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos profilyje (kreivė su „0“ atspindi pradinį grunto drėgnį).

Panašiai, kaip ir ^3H atveju, drėgnio profilis irgi išlyginamas dėl atskiro mėnesio paros parametrų pastovumo (suvidurkinimo). Aeracijos zonos hidraulinio laidumo ir drėgmės srauto greičio vertės yra gana didelės, todėl tomis dienomis, kai nėra kritulių, vandens drėgnis galėtų būti artimas θ_r vertėms.

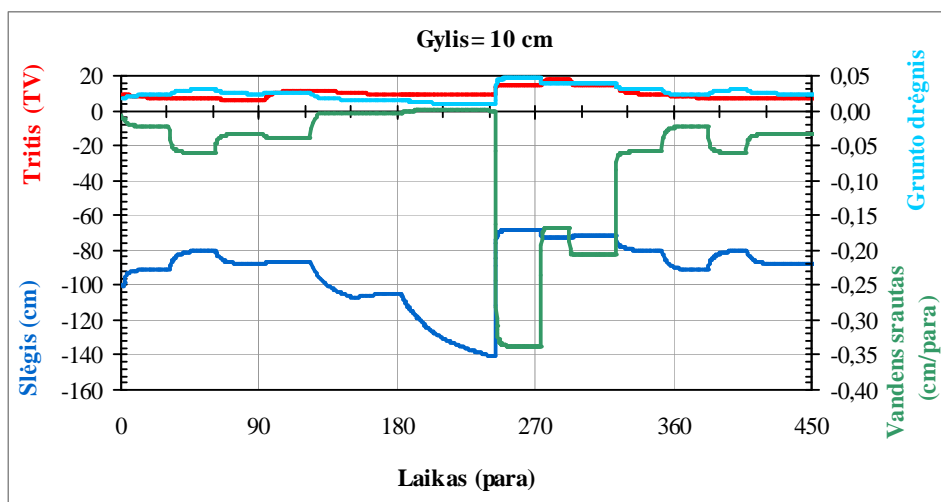
Programoje HYDRUS-1 infiltracija išreiškiama neigiamais skaičiais. Drėgmės judėjimas į viršų dėl garavimo išreiškiamas teigiamais skaičiais. Dėl vienodų vandens srauto įvesties verčių atskiro mėnesio bėgyje mėnesio laikotarpiui išlieka pastovus ir infiltracijos dydis. Infiltracijos srautas lygus nuliui, kai potencialus garavimas yra didesnis negu kritulių kiekis. Didžiausias infiltracijos srautas yra tais laikotarpiais, kai skirtumas tarp kritulių ir potencialaus garavimo yra didžiausias. Skaitinė infiltracijos išraiška buvo teigiama tik keletą dienų, kai potencialus garavimas buvo didesnis už kritulių kiekį. Tada grunto drėgnis sumažėja iki minimalios vertės (θ_r), ir nėra pakankamai vandens atsargų tam, kad vyktų drėgmės judėjimas gilyn. Infiltracinio srauto kaita laiko bėgyje atsispindi 44 pav.



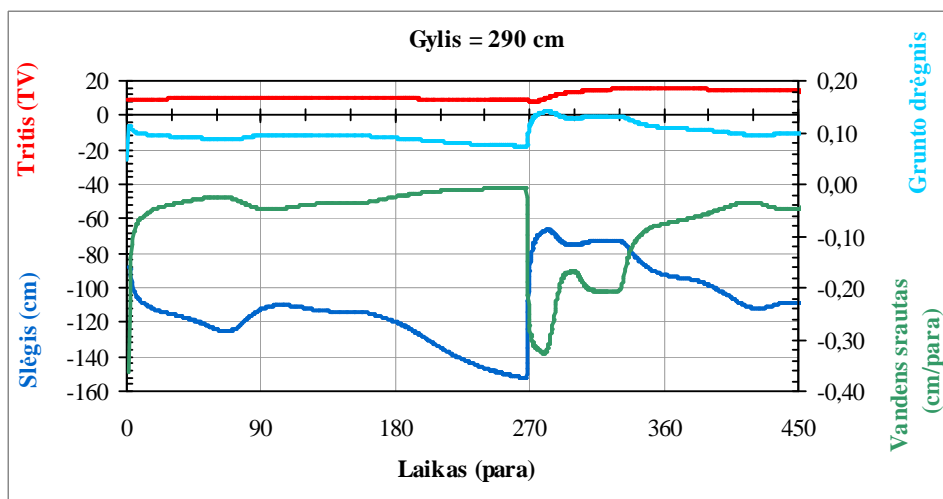
44 pav. Sumodeliuota infiltracijos dydžio (cm/para) mėnesinių verčių kaita 2009–2010 m. laikotarpiu.

^3H koncentracijos grunto drėgmėje, grunto drėgno, siurbiamojo slėgio ir vandens srauto kaita su laiku aeracijos zonos 10 cm, 290 cm ir 500 cm gylyje nuo žemės paviršiaus atsispindi 45–47 pav.

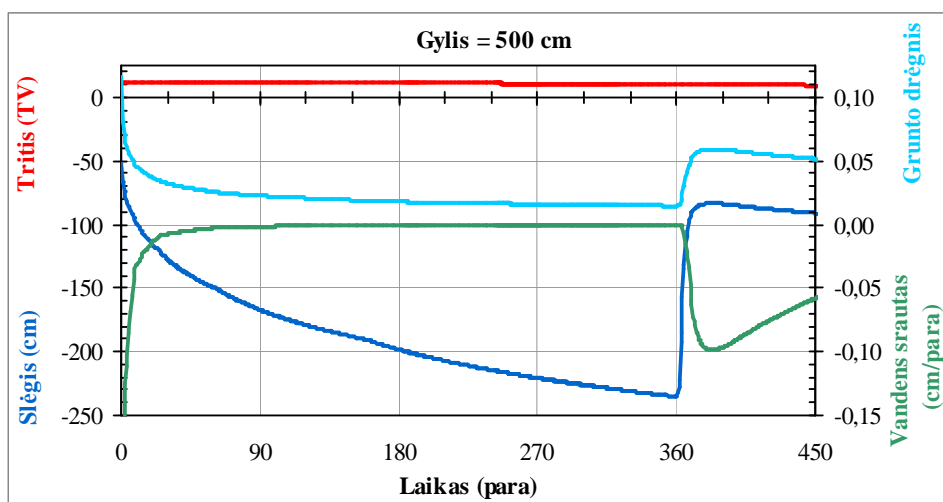
Iš 45–47 pav. galima spręsti, jog kai kurie nagrinėjami kintamieji yra labiau kaitūs arti žemės paviršiaus. Arti žemės paviršiaus vandens srautas ir slėgis labai priklauso nuo kritulių ir potencialaus garavimo skirtumo. Grunto drėgnis padidėja, kai kritulių ir potencialaus garavimo skirtumas yra didesnis. Vandens srautas lygus nuliui, o grunto drėgnis pasiekia minimalią vertę arti žemės paviršiaus, kai potencialus garavimas didesnis negu kritulių kiekis. Tačiau šis poveikis kompensuojamas gilesniuose aeracijos zonos sluoksniuose.



45 pav. Tričio koncentracijos, grunto drėgno, išsiurbiamojo slėgio ir vandens srauto verčių kaita aeracijos zonoje 10 cm gylyje 2009–2010 m. (modeliavimo duomenys).

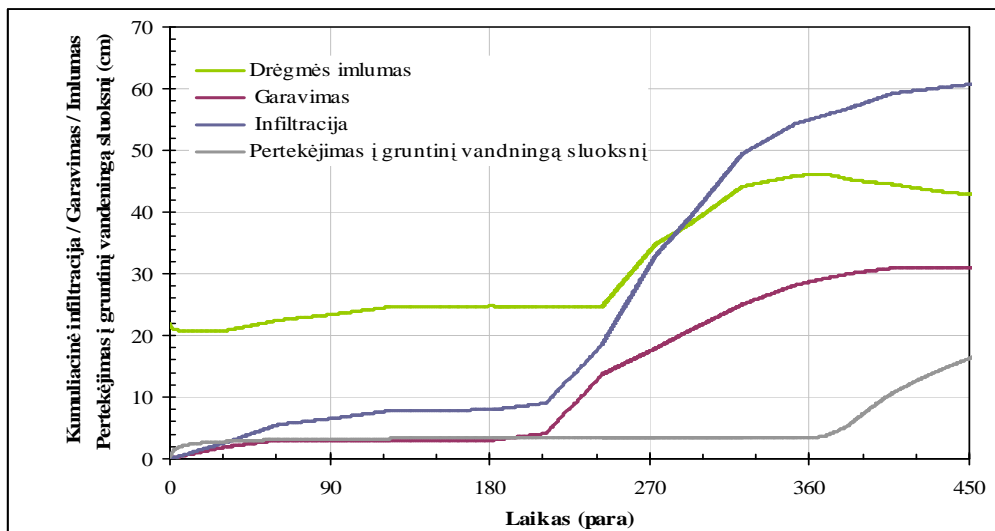


46 pav. Tričio koncentracijos, grunto drėgno, išsiurbiamojo slėgio ir vandens srauto verčių kaita aeracijos zonoje 290 cm gylyje 2009–2010 m. modeliavimo laikotarpiu.



47 pav. Tričio koncentracijos, grunto drėgno, išsiurbiamojo slėgio ir vandens srauto verčių kaita aeracijos zonoje 500 cm gylyje 2009–2010 m. modeliavimo laikotarpiu.

Aeracijos zonos vandens balanso komponentų kitimas laike yra pateiktas 48 pav. Grunto drėgmės imlumas padidėja, kai padidėja infiltracija ir sumažėja garavimas bei vandens pertekėjimas į gruntinį vandeningą sluoksnį. Pertekėjimas į gruntinį vandeningą sluoksnį padidėja, kai išauga infiltracija ir drėgmės imlumas.



48 pav. Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos vandens balanso komponentų kaita 2009–2010 m. modeliavimo laikotarpiu.

Sudarytas ^3H pernašos aeracijos zonoje modelis tinkamai reprezentuoja aeracijos zonos drėgmės ir priemaišų pernašos dinamiką. Tačiau paros įvesties parametrų suvidurkinimas atskiram mėnesiui gali riboti ^3H koncentracijos aeracijos zonos profilyje ir vandens balanso elementų pasiskirstymo atkūrimą.

Išvados

Pagal dviejų vietovių dviejų metų trukmės kritulių $\delta^{18}\text{O}$ ir $\delta^2\text{H}$ tyrimų duomenis buvo nustatyta preliminari lokali meteorinio vandens linija, kuri rytinei Lietuvos daliai išreiškiama tiesine lygtimi ($\delta^2\text{H}=7,8\times\delta^{18}\text{O}+7,2$; $R^2=0,9$), ir tiesinis sąryšis tarp kritulių izotopinės sudėties ir jų formavimosi vietovės oro vidutinės mėnesio temperatūros.

Šiltuoju metų laikotarpiu būdingos mažiau neigiamos kritulių izotopinės sudėties vertės palyginus su šaltuoju laikotarpiu: mėnesio kritulių $\delta^{18}\text{O}$ vertės svyruoja nuo $-20,5\text{‰}$ (sausyje) iki $-5,8\text{‰}$ (rugsėjyje), o $\delta^2\text{H}$ atitinkamai – nuo $-154,2\text{‰}$ iki $-39,4\text{‰}$.

Lyginant su krituliams būdingoms ^3H variacijoms, gruntiniame vandenyje ^3H svyravimų amplitudė labai nedidelė (vidurkis artėja prie 10 TV), tačiau vasaros laikotarpiui būdingos šiek tiek didesnės ^3H koncentracijos (iki 12 TV) ir gruntiniame vandenyje.

Maišiagalos aikštelėje $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ ir ^3H sezoninių smailių pėdsakai yra šiek tiek kontrastiškesni nei Stabatiškės aikštelėje, kadangi Maišiagalos aikštelės aeracijos zonoje drėgmės tranzito laikas trumpesnis, o hidraulinis laidumas didesnis, lyginant su Stabatiškės aikštele.

Stabatiškės aikštelėje 210–230 cm gylyje yra praktiškai nelaidus sluoksnis, kuris funkcionuoja kaip drėgmės ir priemaišų pernašos barjeras. Aeracijos zona virš šio sluoksnio gali būti periodiškai prisotinta, tačiau šis barjeras labai stabdo vandens (ir priemaišų) pernašą žemyn. Todėl priemaišos nuo žemės paviršiuje esančio kapinyno galėtų pasiekti gruntinio vandens lygį, praėjus ilgam laikui tarpui (>35 metai) netgi pastovios taršos atveju. Šiuo saugos aspektu Stabatiškės aikštelė yra palankesnė sąlygose nei Maišiagalos aikštelė.

Aeracijos zonos skaitiniame modelyje priėmus hipotetines žemės paviršiaus užtvindymo sąlygas su pastoviu trejopu vandens slėgiu (žemu, vidutiniu ir aukštu), dėl grunto gerokai didesnio laidumo vandeniui ir kitų palankių hidraulinių savybių drėgmės pernaša ir priemaišų advekcija Maišiagalos aikštelės aeracijos zonos profilyje yra daug greitesnė, lyginant su Stabatiškės aikštelės atveju.

^3H pernašos Maišiagalos aikštelės aeracijos zonoje modeliavimo rezultatai pakankamai gerai koreliuojasi su ^3H eksperimentinių matavimų duomenis, išskyrus mažiausią ^3H koncentracijos vertę 280–300 cm gylyje. Esant trumpam drėgmės apykaitos laikui aeracijos zonoje, ^3H pernašos modelis yra labai jautrus ^3H įeities funkcijai. Siekiant geresnio modeliavimo ir eksperimento rezultatų sutapimo, galima būtų naudoti ^3H įeities funkcijos paros duomenis, tačiau tam būtini labai detalūs ir tikslūs ^3H koncentracijos krituliuose arti tiriamo objekto matavimo rezultatai.

Rekomendacijos

Modeliuojant drėgmės ir priemaišų pernašą aeracijos zonoje, būtina įvertinti profilio grunto hidraulinį laidį ir ryšį tarp hidraulinio laidžio bei grunto drėgmės. Aeracijos zonos hidraulikos apibūdinimui naudojamos empirinės lygtys (van Genuchten, Brooks-Corey ir kt.) reikalauja parametrų, kurie gali būti įvertinti tik kalibruojant skaitinį modelį. Todėl yra labai svarbūs aeracijos zonos grunto drėgnio ir slėgio erdviniai matavimai skirtingais laiko momentais. Tolimesniuose tyrimuose turėtų būti atlikti slėgio ir grunto drėgmės matavimai keliuose profilio gylio intervaluose skirtingais laiko momentais (sausio ir lietingi periodai). Taip pat yra tikslinga atlikti sistemingus gruntinio vandens ir kritulių izotopinius tyrimus. Tuomet drėgmės ir priemaišų pernašos skaitinį modelį galima būtų tiksliau sukaliuoti bei sumažinti jo neapibrėžtis.

Šiame darbe skaitinis modelis taikytas vertikaliajam profiliui, neatsižvelgiant į horizontalųjį drėgmės ir priemaišų srautą. Hidraulinio laidžio verte išsiskiriančių grunto sluoksnių storis ir pasiskirstymas gali būti ne visur vienodas. Todėl reikėtų sudaryti dvimatį modelį, kur būtų atsižvelgiama į galimą horizontalų srautą.

Aeracijos zonos grunto drėgmės izotopinė sudėtis gamtinėse sąlygose (natūralioje aplinkoje) formuojasi, keičiantis meteorologinėmis sąlygoms (krituliai, garavimas, nuotėkis). Todėl sudarant drėgmės ir priemaišų pernašos modelį gamtinėms sąlygoms, svarbu atlikti izotopinės sudėties tyrimus bei įvertinti kritulių kiekį bei garavimo intensyvumą. Kai aeracijos zonos modelis pakankamai gerai atspindi vandens ir priemaišų pernašą gamtinėse sąlygose, priimant skirtingus scenarijus, jis gali būti naudojamas saugos analizėje.

Literatūra

- Adar E.M., Leibundgut Ch. 1995. Application of Tracers in Arid Zone Hydrology. IAHS Publication No. 232. Wallingford.
- Albright W., Tyler S., Hokett S. 1997 Analysis of shallow soil moisture flux adjacent to the area 5 radioactive waste management site, U.S. Department of Energy, Nevada Operations Office, Publication No. 45150, DOE/NV/11508-18, UC-703, Las Vegas, Nevada. 42 p.
- Allison G. B. 1982. The relationship between ^{18}O and deuterium in water and sand columns undergoing evaporation. *J. Hydrol.* 55: p. 163–169.
- Application of Isotopes to the Assessment of Pollutant Behaviour in the Unsaturated Zone for Groundwater Protection IAEA, VIENNA. 2009 ISBN 978-92-0-105509-5 ISSN 1011-4289.
- Barnes C. J., Allison G.B. 1988. Tracing of water movement in the unsaturated zone using stable isotopes of hydrogen and oxygen. *J. Hydrol.* 100: p. 143–176.
- Bandurraga T. M., Bodvarsson G.S. 1999. Calibrating hydrogeologic parameters for the 3-D site-scale unsaturated zone model of Yucca Mountain, Nevada. *J. Contam. Hydrol.* 38. p. 25–46.
- Bodvarsson G. S., Boyle W., Patterson R., Williams D. 1999. Overview of scientific investigations at Yucca Mountain—the potential repository for high-level nuclear waste. *J. Contam. Hydrol.* 38, p. 3–24.
- Branduolinės saugos reikalavimų BSR-3.1.2-2010 „Radioaktyviųjų atliekų tvarkymo branduolinės energetikos objektuose iki jų laidojimo reikalavimai“, įsakymas Nr. 22.3–120.
- Brown R. M. 1961. Hydrology of tritium in the Ottawa Valley, *Geochim. and Cosmochim. Acta*, 21. p. 199–216.
- Brooks R. H., Corey A. T. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrol. Pap.* 3. Colorado State Univ., Fort Collins.
- Clark I. D., Fritz P. 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. New York, Lewis Publishers.
- Coplen TB, Brand WA, Gehre M, Groning M, Meijer HAJ, Toman B, Verkouteren RM. 2006. After two decades a second anchor for the VPDB

- $\delta^{13}\text{C}$ scale. *Rapid communications in mass spectrometry*. 2006, 20: 3165–3166.
- Colbeck S. C. 1972. A theory of water percolation. *Glaciol.* 11, no. 63: 369–385.
- Craig H. 1961a. Standards for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. *Science* 133: 1833–1834.
- Craig H. 1961b. Isotopic variations in meteoric waters. *Science* 133: 1702–1703.
- Craig H., L.I. Gordon. 1965. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and marine atmosphere. In *proc. Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures, 1965, Spoleto, Italy*. p. 9–130.
- Dansgaard W. 1964. Stable isotope in precipitation. *Tellus* 16(4), 436–468.
- Darcy H. 1856. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*, Dalmont, Paris.
- Dobkevičius M. 2002. Determination of the permeability coefficient of unsaturated zone by the method of pouring water into open test pits. *Geologija* Vol , No 1.
- Dobkevičius M. 2001. *Hidrogeodinamika. Enciklopedija*.
- Faybishenko B. A. 1995. Hydraulic behavior of quasi-saturated soils in the presence of entrapped air, *Water Researces Research* 31 (10): 2421–2435.
- Flint A. L., Flint, L. E., Bodvarsson G. S., Kwicklis, E. M., Fabryka-Martin J. 2001. Evolution of the conceptual model of unsaturated zone hydrology at Yucca Mountain, Nevada. *J. Hydrol.* 247, p. 1–30.
- Fontes J. C. 1983. Examples of isotope studies of the unsaturated zone. *Rep. Inst. Geol. Sci.* 82: p 60–70.
- Fontes J. C., Yousfi M., Allison G. B. 1986. Estimation of the long term, diffuse groundwater discharge in the Northern Sahara using stable isotope profiles in soil water. *J. Hydrol.* 86: 315–327.
- Froehlich K., Gibson J. J., Aggarwal P. K. 2002. “Deuterium excess in precipitation and its climatological significance.” In *Study of environmental change using isotope techniques*, Vienna, International Atomic Energy Agency, p. 54–65.

- Grigaliūnienė D. 2001. Radionuklidų migracijos iš paviršinio tipo radioaktyviųjų atliekų kapinynų modeliavimas: Dr. disertacija. Kaunas.
- Geotechniniai tyrimai ir bandymai. Gruntų atpažintis ir klasifikavimas. 2 dalis. Klasifikavimo principai ISO 14688-2:2004.
- Healy R. W. 1990. Simulation of Solute Transport in Variably Saturated Porous Media with Supplemental Information on Modifications to the U.S. Geological Survey's Computer Program VS2D. Water Resources Investigation Report 90-4025, U.S. Geological Survey.
- Higienos norma HN 87: 2002. Radiacinė sauga branduolinės energetikos objektuose, Žin., 2003, Nr. 15–624.
- Huang K., Mohanty B.P., van Genuchten M.Th. 1996. A new convergence criterion for the modified Picard iteration method to solve the variably saturated flow equation. *Journal of Hydrology* 178 (1996). p. 69–91.
- Huyakorn P. S., Kool J. B., Robertson J. B. 1989. Documentation and User's Guide: VAM2D - Variably Saturated Analysis Model in Two Dimensions, NUREG/CR-5352, HGL/89-01, U. S. Nuclear Regulatory Commission.
- IAEA. 2004. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities. Results of a cooperation research project. Vol. 1: Review and enhancement of safety assessment approaches and tools. Vienna: International Atomic Agency. 408.
- IAEA. 1999. Safety guide. Safety Standards series No. WS-G-1.1 International Atomic Energy Agency. Vienna.
- Yim M-S., Scott A. S. 2000. Performance Assessment Models for Low Level Radioactive Waste Disposal Facilities: A Review. *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 36, No. 1, p. 1–38.
- Jacques D., Šimunek J., Mallants D., van Genuchten M. Th. 2005. Modelling uranium leaching from agricultural soils to groundwater as a criterion for comparison with complementary safety indicators, *Proceedings of 29th Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management*, September 12–16, Ghent (Belgium).
- Jakimavičiūtė-Maseliienė V., Mažeika J., Skuratovič Ž. 2008. Water flow in the different types of unsaturated soils in Lithuania, In: J. Šimunek and R. Kodešova (eds.), *Proc. of The Second HYDRUS Workshop*, March 28, 2008, Dept. of Soil Science and Geology, Czech University of Life Sciences, Prague, Czech Republic, ISBN 978-80-213-1783-3, p.79–84.

- Jensen D. T., Hargreaves G. H., Temesgen B., Allen R. G. 1997. Computation of Eto under nonideal conditions, *J. Irrig. Drainage*, 123(5), p. 394–400.
- Juodkasis V., Mažeika J., Petrošius R. 1995. Radioizotopiniai metodai ekologinėje hidrogeologijoje. *Geologija*. Nr. 18, 132 p.
- Juodkasis V. 1979. Pabaltijo hidrogeologijos pagrindai. Vilnius: Mokslas, p. 33–51.
- Jury W. A., Gardner W. R., Gardner W. H. 1991. *Soil Physics*, 5th Edition. John Wiley and Sons, Inc., New New York.
- Kendall C., McDonnell J. J. 1998. *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Elsevier, Amsterdam.
- Klizas P. 1994. Drėgmės migracijos ir vandens filtracijos neįsotintose uolienose laboratoriniai ir lauko įvertinimai Disertacija. Vilniaus universitetas, Geologijos institutas.
- Koeniger P., Leibundgut C., Link T., John D. 2009. Stable isotopes applied as water tracers in column and field studies. *Organic Geochemistry*.
- Lappala E. G., Healy R. W., Weeks E. P. 1987. Documentation of Computer Program VS2D to Solve the Equations of Fluid Flow in Variably Saturated Porous Media, Water Resources Investigation Report 83–4099, U. S. Geological Survey.
- Leibundgut C. H. 1995. *Tracer Technologies for Hydrological Systems*. IAHS Publication No. 229, Wallingford.
- Levitt D. G., Sully M. J., Dozier B. L., Lohrstorfer C. F. 1999. Determining the performance of an arid zone radioactive waste site through site characterization, modeling and monitoring, *Proceedings of Waste Management 99*, Nevada.
- Libby W. F. 1946. Atmospheric helium three and radiocarbon from cosmic radiation. *Phys. Rev.* 69: 671–672.
- Lucas L. L., Unterweger M. P. 2000. Comprehensive review and critical evaluation of the half-life of tritium. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*
- Mallants D. 2006. Basic concepts of water flow, solute transport, and heat flow in soils and sediments. 2nd ed. SCK-CEN, Belgium.

- Mažeika J. 2002. Radionuclides in Geoinvironment of Lithuania. Vilnius.
- Mažeika J. 2006. Vandens srauto analizė ir radionuklidų sklaidos paviršinio kapinyno aplinkoje prognozė. Vilnius.
- Mažeika J., Petrošius R. 1995. Radiacinės avarijos poveikio hidrosferai įvertinimo būdai Ignalinos AE regiono sąlygomis. Ignalinos atominės elektrinės poveikis gamtai ir visuomenei. Mokslinių straipsnių rinkinys. Vilnius. p. 315–321
- Maloszewski P., Moser H., Stichler W., Trimbom P. 1995. Isotope hydrology investigations in large refuse lysimeters. *J. Hydrol.* 167: 149–166.
- Marcinkevičius V. (ats. vykd.) ir kt. 1995. Ataskaita už atliktą 1: 50 000 mastelio kompleksinę geologinę – hidrogeologinę ir inžinerinę geologinę nuotrauką Ignalinos AE rajone Lietuvos, Baltarusijos ir Latvijos Respublikų teritorijoje. (Drūkšių objektas) Lietuvos geologijos tarnyba. Fond. Nr. 4384. Vilnius.
- Mokrik R., Mažeika J., Baublytė A., Martma T. 2008. The groundwater age in the Middle-Upper Devonian aquifer system, Lithuania. *Hydrogeology Journal*, 17, 2009, 971–889.
- Mokrik R., Mažeika J. 2006. Hidrogeochemija. Vadovėlis aukštosios mokykloms. Vilniaus universiteto leidykla.
- Mook W. G. 2000. Environmental isotopes in the hydrological cycle. Principle and Applications. Volume I. *Centre for Isotope Research Groningen*. UNESCO/IAEA Series on Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. J.J.de Vries, Free University, Amsterdam
- Munnich K. O., Sonntag C., Christmann D., Thoma D. 1980. Isotope fractionation due to evaporation from sand dunes. 2. *Mitt. Zentralinst. Isot. Strahlenforsch.* 29. p. 319–332.
- Mualem Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12. p. 513–522.
- Monteith J. L. 1981. Evaporation and surface temperature, *Quarterly J. Royal Meteor. Soc.*, 107, p. 1–27.
- Nelson S.T. 2000. A simple, practical methodology for routine VSMOW/SLAP normalization of water samples analyzed by continuous flow methods, *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 14. 1044–1046.

- Neuman S. P. 1975. Galerkin approach to saturated-unsaturated flow in porous media, Chapter 10 in *Finite Elements in Fluids, Vol. I, Viscous Flow and Hydrodynamics*, edited by R. H. Gallagher, J. T. Oden, C. Taylor, Zienkiewicz. O. C., John Wiley and Sons, London. p. 201–217.
- Nier, A. O. 1950. A redetermination of the relative abundances of the isotopes of carbon, nitrogen, oxygen, argon and potassium. *Phys. Rev.* 77. p. 789–793.
- Paviršinio radioaktyviųjų atliekų kapinyno įrengimo PAV ataskaita. RATA 2007, Vilnius.
- Performance assessment models for low level radioactive waste disposal facilities. 2000. *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 36, No. 1, p. 1–38,.
- Performance assessment of near-surface facilities for disposal of low-level radioactive waste. 2006. National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP report; no. 152.
- Performance Assessment of Near-Surface Facilities for Disposal of Low-Level Radioactive Waste. 2005. National Council on Radiation Protection and Measurements 7910 Woodmont Avenue, Suite 400 / Bethesda, MD 20814–3095.
- Performance of engineered barrier materials in near surface disposal facilities for radioactive waste 2001. IAEA-TECDOC-1255 ISSN 1011–4289. IAEA, VIENNA.
- Peters N. E., Leibundgut Ch. 1993. Tracers in Hydrology. IAHS Publication No. 215, Wallingford.
- Perrochet P., Berod D. 1993. Stability of the standard Crank-Nicolson-Galerkin scheme applied to the diffusion-convection equation: some new insights, *Water Resour. Res.*, 29(9), 3291–3297.
- Piet S. J., Jacobson J. J., Martian P., Martineau R., Soto R. 2003. Modeling and Simulation of Long-Term Performance of Near-Surface Barriers, WM'03 Conference, February Tucson, AZ p. 23–27.
- Pinder G. F., Gray W. G. 1977. *Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology*, Academic Press, New York, N.Y.
- Radioaktyviosios atliekos. Vietų, tinkamų galutinai saugoti trumpaamžes radioaktyviašias atliekas, parinkimas. 2006. Radioaktyviųjų atliekų tvarkymo agentūra. Vilnius: RATA.

- Report on Hydrogeological and Hydrological investigations of Stabatiske Site. 2011. Site Survey Confirmation Stage for Design and Safety Assessment. Project B25-1: Near Surface Repository for Low and Intermediate Level Short-Lived Radioactive Waste (Design). JSC Geotestus, JSC Specialus montazas-NTP.
- Reference Design for a Near Surface Repository for Low and Intermediate Level Short Lived Radioactive Waste in Lithuania: Final Project Report, Stockholm: SKB, SWECO International, Westinhouse Atom, 2002.
- Richards L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. J. Physics, Vol. 1: p. 318–333.
- Rozanski K., Araguds-Araguds L., Gonfiantini R. 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. In P. K. Swart, K. C. Lohman, J. McKenzie and S. Savin (eds.) *Climate Change in Continental Isotopic Records – Geophysical Monograph 78*, American Geophysical Union, Washington, D. C.
- Rozanski K., Sonntag C., Munnich, K. 1982. Factors controlling stable isotope composition of European precipitation. *Tellus* 34 (2), p. 142–150.
- Schaap M. G., Leij F. J. 1999. Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem -van Genuchten, Submitted to Soil Sci. Soc. Am.J.
- Schaap M. G., Leij F. J., van Genuchten. M. Th. 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.* 251. p. 163–176.
- Smith R. E., Hebbert R. H. B. 1983. Mathematical simulation of interdependent surface and subsurface hydrologic processes. *Water Resour. Res.*, 19. 987–1001.
- Sposito G. 1986. The "physics" of soil water physics, *Water Resour. Res.*, 22: 83S–88S.
- Stabatiškės stebėsenos duomenų analizė. Geologijos ir geografijos institutas. Ataskaita, 2009 Vilnius.
- Sullivan T. M. 1993. Disposal Unit Source Term (DUST). Data Input Guide. NUREG/CR-6041, BNL-NUREG-52375. Brookhaven National Laboratory. Upton, New Yourk. 11–973.

- Šejna M., Šimunek J. 2007. HYDRUS (2D/3D): Graphical user interface for the HYDRUS Software package simulating two and three dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, published online at www.-pc-progress.cz, PC-Progress, Prague, Czech Republic.
- Šimunek J., M. Sejna, Saito H., Sakai M., van Genuchten M. Th. 2008. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, Version 4.0, Hydrus Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA, USA.
- Šimunek J., Huang, K., van Genuchten M. Th. 1998. The HYDRUS-1D code for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 6.0, Research Report No. 144, USSS-ARS-USDA, Riverside, California. 15–40.
- Šimunek J., Huang K., van Genuchten M.Th. 1995. The SWMS–3D code for simulating water flow and solute transport in three-dimensional variably saturated media. Version 1.0. Res. Rep. 139. U.S. Salinity Lab., Riverside, CA.
- Šimunek J., Huang K., van Genuchten M.Th. 1998b. The HYDRUS code for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 6.0. Res. Rep. 144. U.S. Salinity Lab., Riverside, CA.
- Šimunek J., Šejna M., van Genuchten M.Th. 1996a. The HYDRUS-2D software package for simulating water flow and solute transport in twodimensional variably saturated media. Version 1.0. IGWMC-TPS-53. Int. Ground Water Modeling Ctr., Colorado School of Mines, Golden.
- Šimunek J., Vogel T., van Genuchten M.Th. 1992. The SWMS_2D code for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media. Version 1.1. Res. Rep. 126. U.S. Salinity Lab., Riverside, CA.
- Thornthwaite C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate, *Grog, Review* 38. p. 55–94.
- van Genuchten M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44. 892–898.

- van Genuchten M.Th . 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Res. Rep. 121. U.S. Salinity Lab., Riverside, CA.
- Visuotinė lietuvių enciklopedija, T. X (Khmerai-Krelle). V.: Mokslo ir enciklopedijų leidybos institutas, 2006.
- Vogel T., and M. Cislerova. 1988. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. *Transp. Porous Media* 3:1–15.
- Voss C. I. 1984. A Finite element simulation model for saturated–unsaturated fluid density dependent ground water flow with energy transport or chemically reactive single species solute transport. U.S. Geological Survey Water Resource Investigations. Report. 84–4369.
- Wang H. F., Anderson M. P. 1995. Introduction to groundwater modelling: Finite difference and finite element methods, Academic Press, results from field and laboratory data, *Applied Clay Science* 26. 256 p.
- Warrick I., Arthur W. 2002. Soil physics companion. ISBN 0-8493-0837-2.
- Wersina P., Van Loonb L.R., Solerc, J.M., Yllerad, A., Eikenbergb, J., Gimmib, Th., Hernane, P., Boissonf, J.-Y. 2004. Long-term diffusion experiment at Mont Terri: first results from field and laboratory data, *Applied Clay Science* 26. 123–135.
- Zienkiewicz O.C. 1977. *The Finite Element Method*, 3rd ed., McGraw-Hill, London, United Kingdom.
- Zimmermann U., Ehhalt D., Münnich K.O. 1967. Soil water movement and evapotranspiration: changes in the isotopic composition of the water. In: *Isotopes in Hydrology* (Proc. Symp., Vienna), 567-585. IAEA, Vienna, Austria.
- Zimmermann U., Münnich K.O, Roether W. 1967. Downward movement of soil moisture traced by means of hydrogen isotopes. In: *Isotope Techniques in the Hydrologic Cycle*, Geophysical Monograph Series 11, American Geophysical Union.
- Zimmerman U., Ehhalt D. and Munnich K.O. 1967. Soil-water and evapotranspiration: changes in the isotopic composition of the water P. Proc. IAEA Symp. Isot. Hydrol., IAEA, Vienna.

Zuzevičius A., Mažeika J., Baltrūnas V. 2007. A model of brackish groundwater formation in the Nemunas River valley. *Geologija Lithuania*, Vilnius. ISSN 1392-110X. No. 60. 63–75.

Žemaitis V., Chomcenko R., Kučenko L., Kilda L., Dmukauskas A. 1995. Aeracijos zonos monitoringas. *Geologijos institutas*, Vilnius. 6.

Добкевичюс М. Исследование и развитие методов определения фильтрационных свойств пород зоны аэрации (на примере Литвы). Габилитационная работа. Вильнюс, 2002.

Кундас С. П., Гишкелюк И. А., Коваленко В. И., Хилько О. С. 2011. Компьютерное моделирование миграции загрязняющих веществ в природных дисперсных средах; под общ. ред. С. П. Кундаса – Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова.

Пачепский, Я. А. 1990. Математические модели физико-химических процессов в почвах / Я. А. Пачепский. – М.: Наука, 1990. с. 180.

Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности. 2003 год. Серия изданий по безопасности, No WS-R-1 Международное агенство по атомной энергии. Вена.

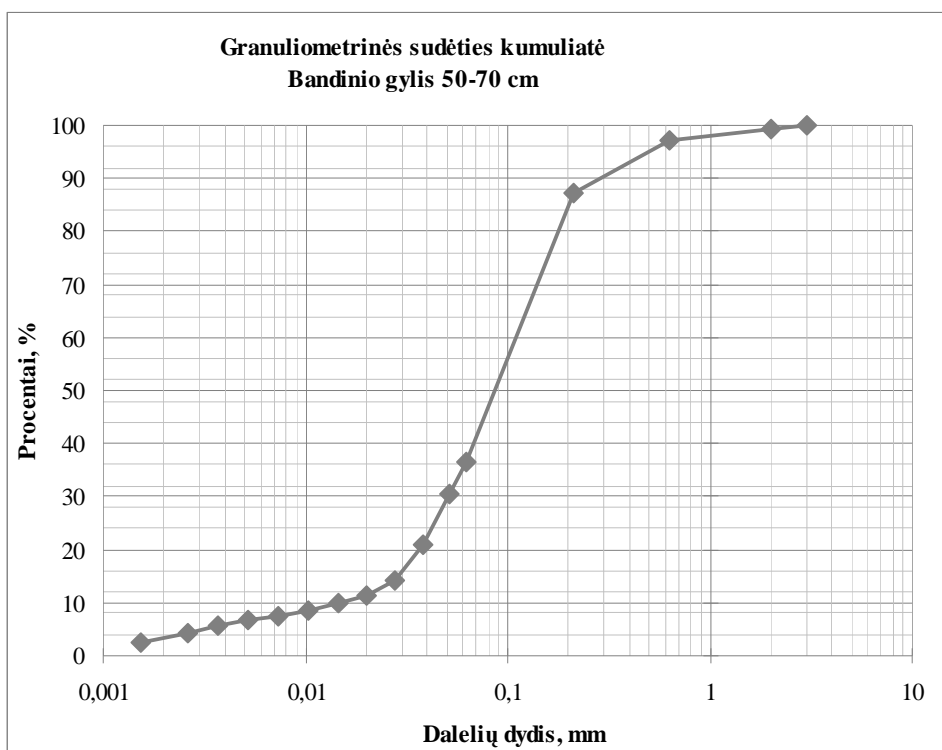
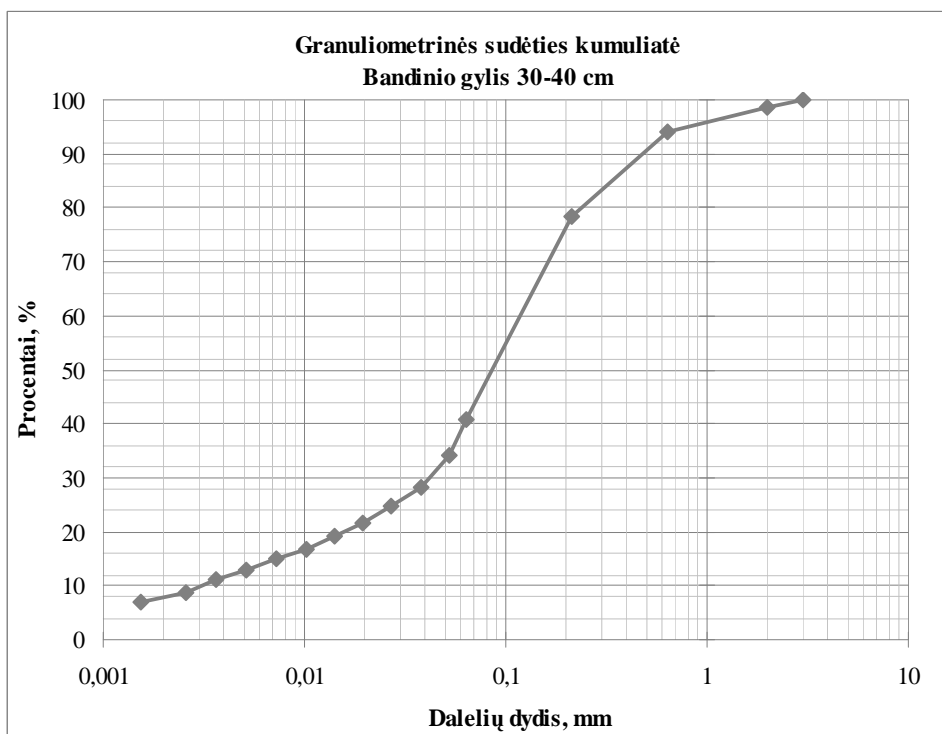
<http://nucleus.iaea.org/sso/NUCLEUS.html?exturl=http://isohis.iaea.org/>.
Žiūrėta 2010 m. rugsėjo 10 d.

<http://www.rata.lt/lt.php/maisiagala>. Žiūrėta 2009 m. spalio 11 d.

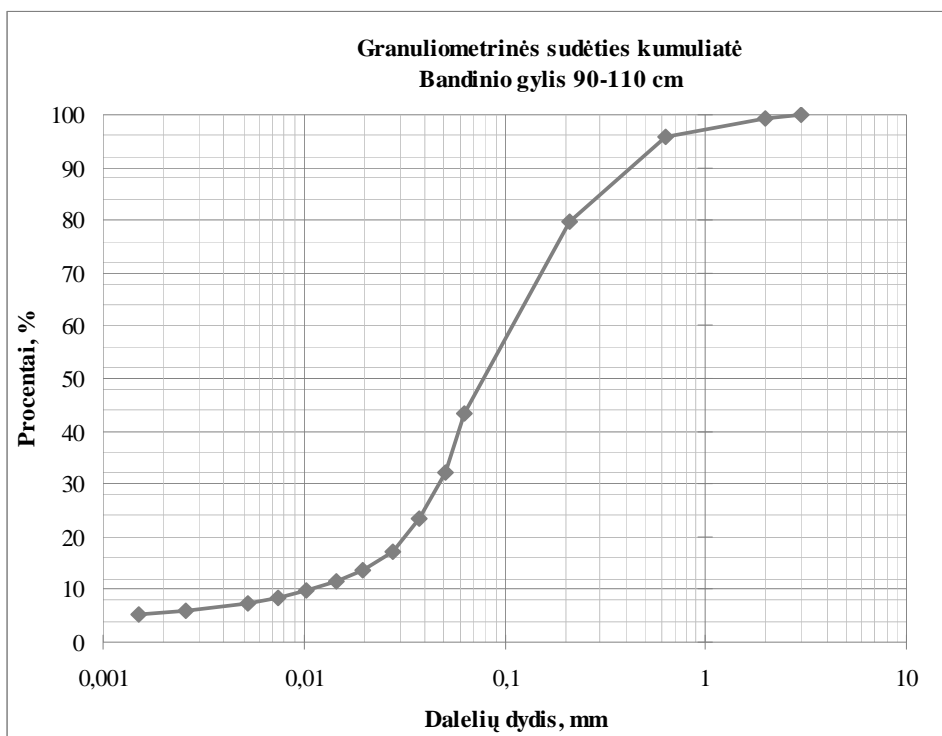
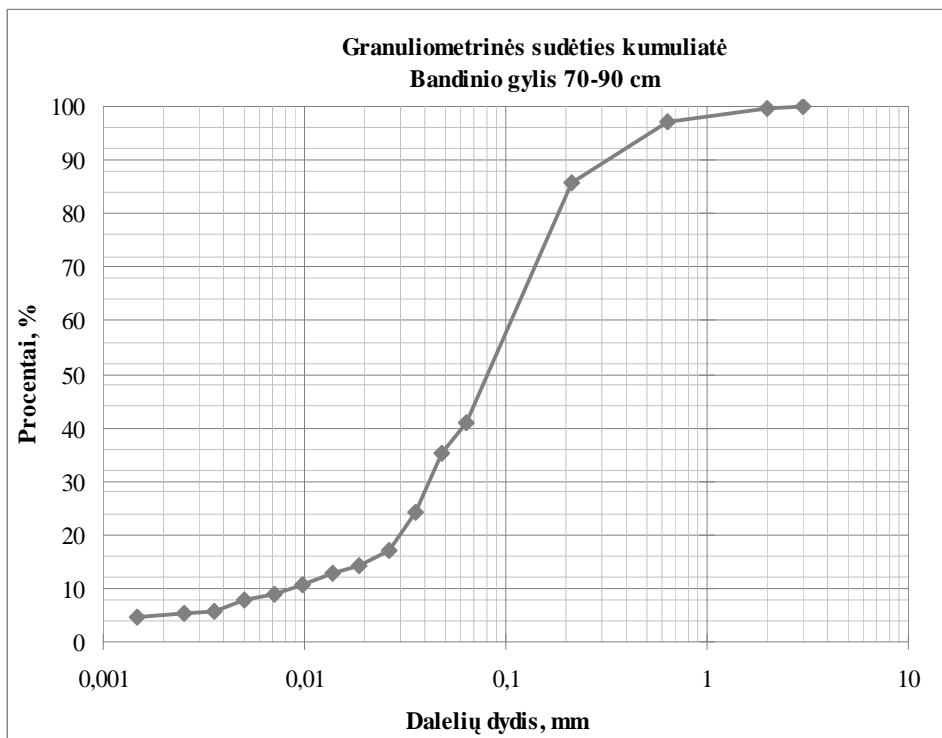
<http://www.surechem.com.my/download/eijkelkamp/P1/P1-30e.pdf>. Žiūrėta 2011 m. rugsėjo 10 d.

<http://www.rata.lt/lt.php/radioaktyviu-atlieku-tvarkymas> . Žiūrėta 2012 m. rugsėjo spalio 20 d.

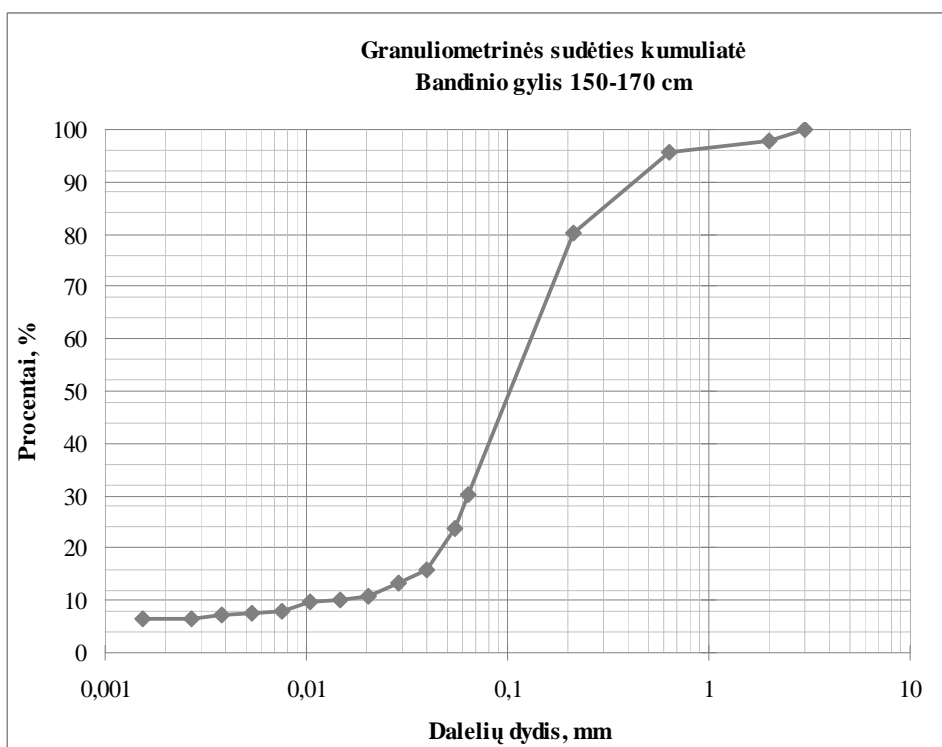
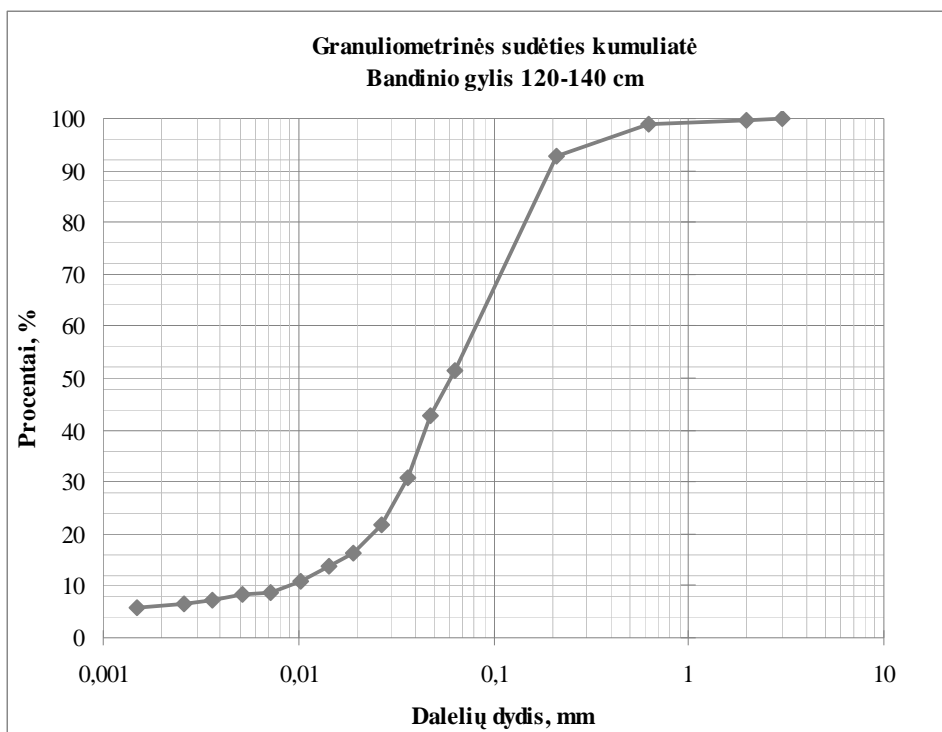
PRIEDAI



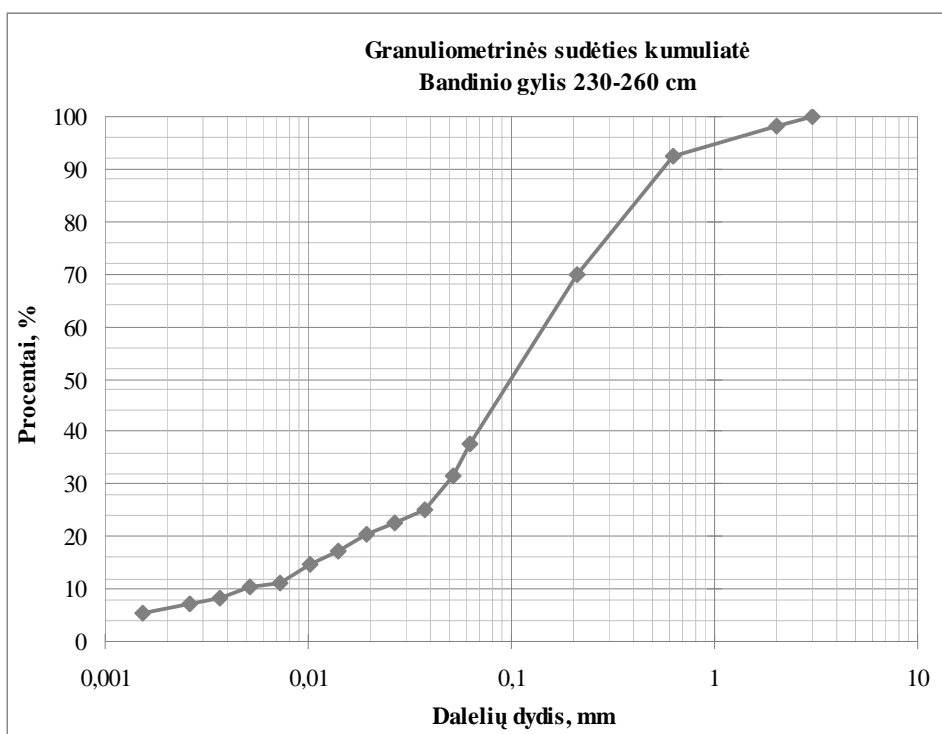
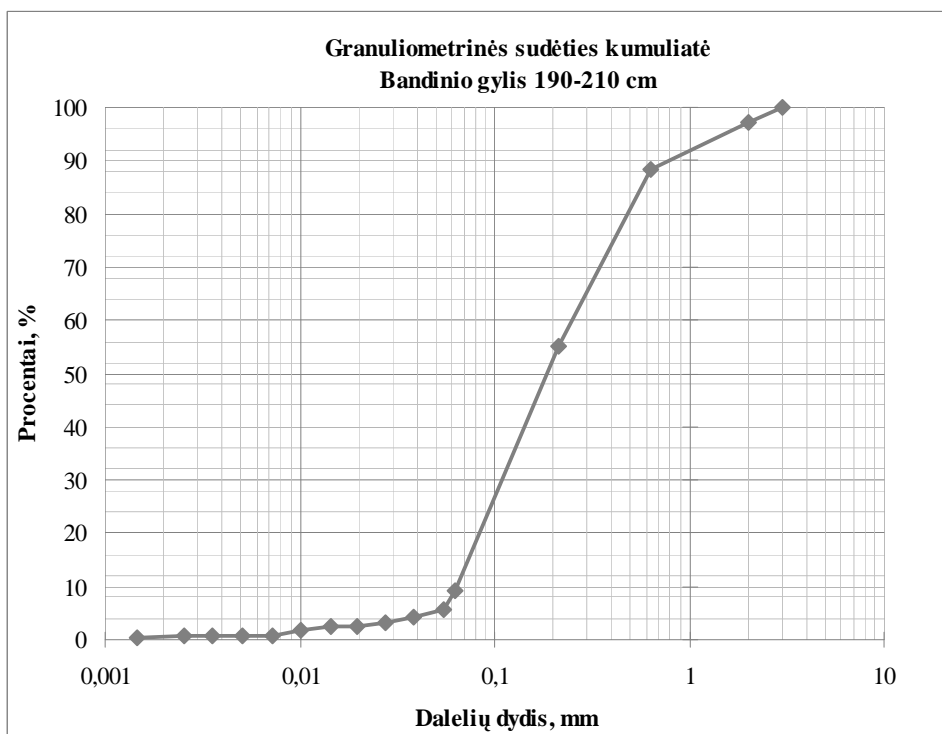
1 priedas. Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos grunto granulimetrinės sudėties kreivės.



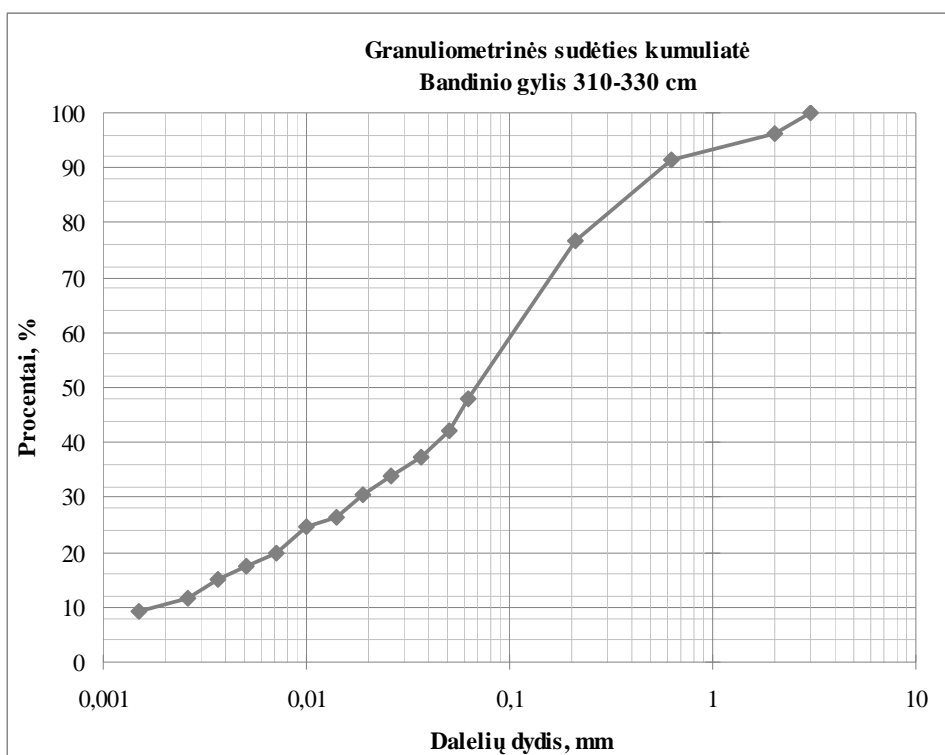
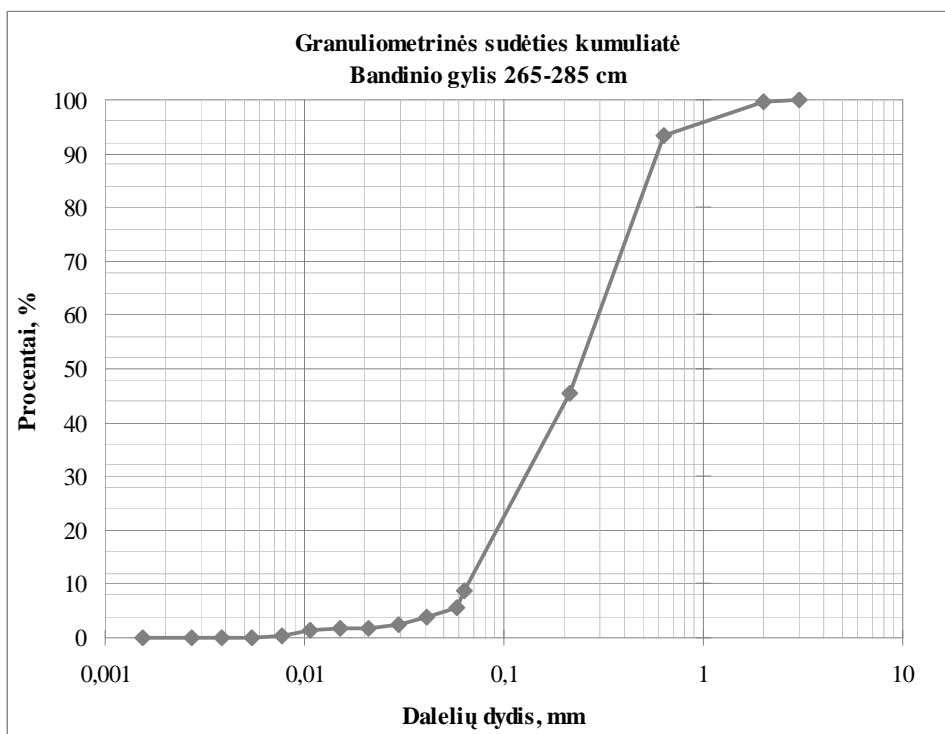
2 priedas. Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos grunto granulimetrinės sudėties kreivės.



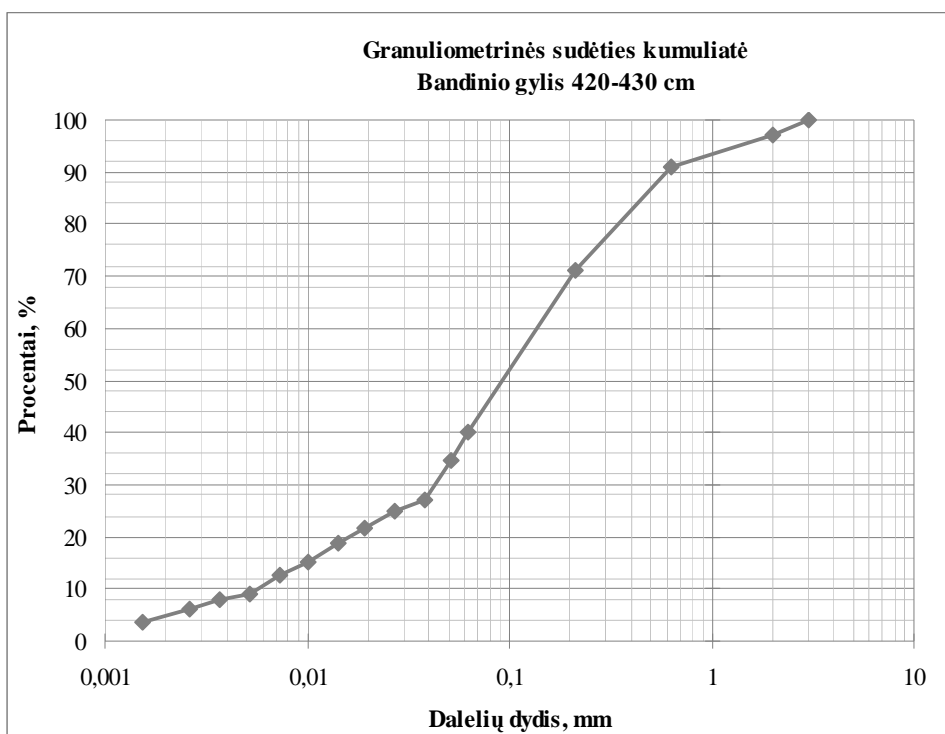
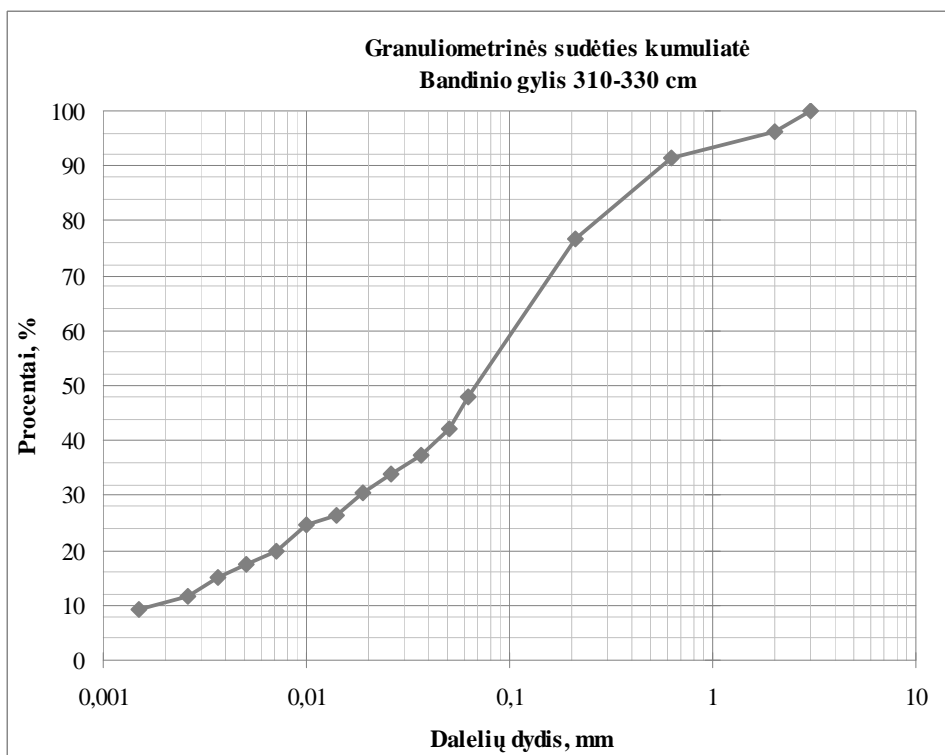
3 priedas. Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos grunto granulimetrinės sudėties kreivės.



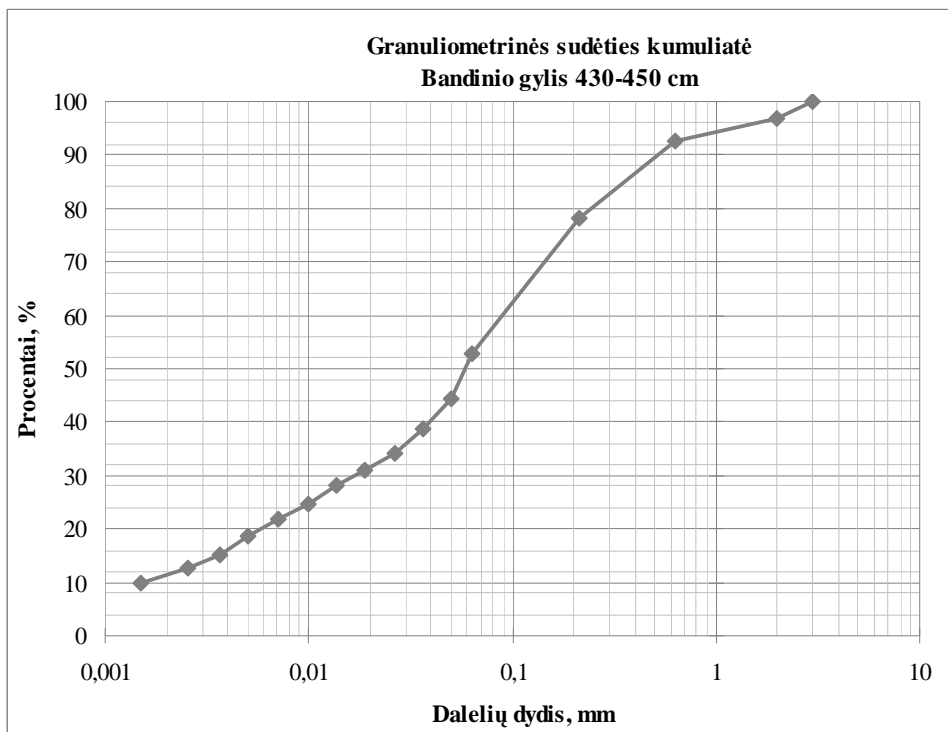
4 priedas. Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos grunto granulimetrinės sudėties kreivės.



5 priedas. Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos grunto granulimetrinės sudėties kreivės.



6 priedas. Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos grunto granulimetrinės sudėties kreivės.



7 priedas. Stabatiškės aikštelės aeracijos zonos grunto granulimetrinės sudėties kreivė.