https://doi.org/10.15388/vu.thesis.967

https://orcid.org/0000-0001-2345-6789

VILNIAUS UNIVERSITETAS

GAMTOS TYRIMŲ CENTRAS

Roma Kanopienė

Lietuvos geologinių sąlygų tinkamumas giluminio radioaktyviųjų atliekų atliekyno įrengimui

DAKTARO DISERTACIJA

Gamtos mokslai

Geologija (N 005)

VILNIUS 2026

Disertacija rengta 2020–2025 metais Vilniaus universitete.

Mokslinis vadovas – doc. dr. Saulius Gadeikis (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, geologija, N 005).

Mokslinis konsultantas – doc. dr. Gintaras Žaržojus **(**Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, geologija, N 005).

Gynimo taryba:

Pirmininkas –dr. Jonas Satkūnas (Gamtos tyrimų centras, gamtos mokslai, geologija, N 005).

Nariai:

prof. hab. dr. Albertas Bitinas (Gamtos tyrimų centras, gamtos mokslai, geologija, N 005),

dr. Gražina Skridlaitė (Gamtos tyrimų centras, gamtos mokslai, geologija, N 005),

doc. dr. Šarūnas Skuodis (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija, T 002).

prof. dr. Alvar Soesoo (Talino technologijos universitetas, gamtos mokslai, geologija, N 005).

Disertacija ginama viešame Gynimo tarybos posėdyje 2026 m. rugsėjo mėn. 25 d. 13 val. Vilniaus Universiteto Chemijos ir geomokslų fakulteto Geomokslų instituto didžiojoje auditorijoje. Adresas: M. K. Čiurlionio 21, Vilnius, Lietuva, tel. +370 52 398 283; el. paštas info@chgf.vu.lt.

https://doi.org/10.15388/vu.thesis.967

https://orcid.org/0000-0001-2345-6789

VILNIUS UNIVERSITY

NATURE RESEARCH CENTRE

Roma Kanopienė

Suitability of Lithuanian Geological Conditions for the Deep Geological Repository of Radioactive Wastes

DOCTORAL DISSERTATION

Natural Sciences

Geology (N 005)

VILNIUS 2026

The dissertation was prepared between 2020 and 2025 at Vilnius University

Academic Supervisor – Assoc. Prof**.** Dr. Saulius Gadeikis (Vilnius University, Natural Sciences, Geology, N 005).
Academic Consultant – Assoc. Prof**.** Dr. Gintaras Žaržojus (Vilnius University, Natural Sciences, Geology, N 005).

This doctoral dissertation will be defended in a public/closed meeting of the Dissertation Defence Panel:

Chairman – Dr. Jonas Satkūnas (Nature Researche Center, Natural Sciences, Geology, N 005).
Members:
Prof. Habil. Dr. Albertas Bitinas (Nature Researche Center, Natural Sciences, Geology, N 005),
Dr. Gražina Skridlaitė (Nature Researche Center, Natural Sciences, Geology, N 005),
Assoc. Prof. Dr. Šarūnas Skuodis (Vilnius Gediminas Technical University, Technology Sciences, Civil Engineering, T 002),
Prof. Dr. Alvar Soesoo (Tallinn University of Technology, Natural Sciences, Geology, N 005).

The dissertation shall be defended at a public meeting of the Dissertation Defence Panel at 13.00 on 25 September 2026 in Didžioji room of the Faculty of cChemistry and Geosciences, Institute of Geosciences. Address: M. K. Čiurlionio street, No 21, Didžioji Room., Vilnius, Lithuania Tel. +370 52 398 283 ; e-mail: info@chgf.vu.lt.

SANTRUMPOS

COx - juros sistemos Kelovėjo ir Oksfordžio aukštų molingų uolienų, sudarančių Prancūzijos Cigeo projekto planuojamo GA artimąjį lauką, formacija.

EBPO - pasaulinė ekonominio bendradarbiavimo ir plėtros organizacija.

GA - giluminis radioaktyviųjų atliekų atliekynas.

IAE – Ignalinos atominė elektrinė

IBS - inžinerinių barjerų sistema.

KPZ - kasybos pažeista zona (*angl. EDZ - excavation damage zone*).

NEA - branduolinės energijos agentūra prie EBPO.

OPA - apatinės ir vidurinės juros Opalinus molingų perkonsoliduotų uolienų formacija, kurioje planuojamas Šveicarijos GA.

PBK - panaudotas branduolinis kuras.

RA - radioaktyviosios atliekos.

SPR - savybės procesai ir reiškiniai (*angl. FEPs - features, events and processes*).

TATENA - tarptautinė atominės energijos agentūra

SĄVOKOS

RA tvarkymo ir GA programų įgyvendinimo dokumentuose vartojamos sąvokos dažnai nėra universalios ir priklauso nuo valstybių teisės aktų reikalavimų. Pagrindines sąvokas apibrėžia TATENA dokumentai, tačiau jas vartojant įvairiose šalyse dažnai susiduriama su vertimo netikslumais.

Artimasis laukas *(angl. near field)* - uoliena, geologinio kūno dalis, supanti atliekyną, jo veikiama įvairiomis kryptimis ir atstumais. Šios įtakos zonos dydis priklauso nuo geologinės sandaros, atliekyno formos, šilumos išsiskyrimo už saugyklos ribų ir kt. Ši uolienos (geologinės formacijos) dalis dar gali būti vadinama saugyklos įtakos zona (Savage D. et al., 1995).

Atliekynas - atliekų (paprastai radioaktyviųjų) kaupimo, tvarkymo ir nuolatinio saugojimo įrenginys. Radioaktyviųjų atliekų atliekynas (toliau – atliekynas) – radioaktyviųjų atliekų tvarkymo įrenginys, į kurį dedamos radioaktyviosios atliekos neketinant jų išimti (pagal L R radioaktyviųjų atliekų tvarkymo įstatymą).

Barjeras – fizinė kliūtis, kuri užkerta kelią arba sulėtina radionuklidų bei kitų, turinčių radionuklidų, medžiagų judėjimą tarp radioaktyviųjų atliekų tvarkymo įrenginio elementų. Barjerai gali būti inžineriniai ir gamtiniai (pagal L R radioaktyviųjų atliekų tvarkymo įstatymą).

GA sistema - giluminio atliekyno sistema - tarpusavyje susijusių RA, inžinerinių ir gamtinių barjerų visuma.

Geologinė formacija - formacija (lot. formatio – pavidalo suteikimas, kūrimas), genetiškai susijusių uolienų kompleksas, susidaręs tam tikromis tektoninio režimo ir klimato sąlygomis dideliame plote per ilgą geologinio laiko intervalą. Formacijas sudaro tiek nuosėdinės, tiek metamorfinės, tiek magminės uolienos (pagal https://www.vle.lt/).

Giluminis atliekynas - inžinerinis statinys, įrengtas kelių šimtų metrų gylyje (200–700 m) stabiliose geologinėse formacijose, kur žmonių ir aplinkos saugą užtikrina natūralūs gamtiniai barjerai (giliai slūgstančios uolienos) ir keletas vienas kitą papildančių dirbtinių (inžinerinių) barjerų (pagal https://lt.wikipedia.org/wiki/).

Kriterijai – sąlygos, kuriomis gali būti pagrįstas sprendimas ar vertinimas. Kriterijai gali būti kokybiniai ir kiekybiniai, ir turi remtis nustatytais principais ar standartais. Radioaktyviųjų atliekų tvarkyme kriterijai ir reikalavimai yra nustatomi reguliuojančios institucijos ir gali remtis tam tikru bendresnių principų taikymu (IAEA, 1994). Geologiniai kriterijai – savybių, procesų ir reiškinių, kurie gali būti identifikuoti, apibūdinti ir įvertinti panaudojant geologinių tyrimų duomenis, visuma (Kanopienė, Gadeikis 2022).

Potenciali geologinė formacija - geologinis kūnas, sluoksnio dalis ar keletas sluoksnių, pasižymintis palankiomis giluminio radioaktyviųjų atliekų atliekyno įrengimui slūgsojimo sąlygomis ir savybėmis.

Radiacinė sauga – visuma teisės, technikos, technologijos, statybos, higienos normų, taisyklių bei priemonių, kuriomis užtikrinama žmonių ir

aplinkos apsauga nuo žalingo jonizuojančios spinduliuotės poveikio (pagal L R Branduolinės energijos įstatymą).

Radioaktyviosios atliekos - panaudotas branduolinis kuras ir kitos kietosios, skystosios ar dujinės pakartotinai naudoti neskirtos radioaktyviosios medžiagos, kurios neatitinka nebekontroliavimo kriterijų ir kurioms reguliuojančioji institucija taiko reguliuojamąją kontrolę (pagal L R radioaktyviųjų atliekų tvarkymo įstatymą).

Tinkamumas *(angl. usability, suitability)* - savybių, reikalingų galutiniam tikslui pasiekti ar atitinkančių tam tikrus kriterijus, visumos įvertis. Tinkamumas gali būti vertinamas kokybiškai arba kiekybiškai.

Tinkamumo kriterijai - procesai, reiškiniai ar savybės, reikalingos galutiniam tikslui pasiekti ar produktui pagaminti (GA atveju - galutinai sutvarkyti RA).

Tolimasis laukas *(angl. far field)* - geosfera arba geologinis barjeras, visos uolienos aplink GA iki žemės paviršiaus. Tarp šio barjero ir biosferos ne visada egzistuoja aiški riba (Savage et al, 1995).

TURINYS

ĮVADAS 10

1. RADIOAKTYVIŲJŲ ATLIEKŲ GALUTINIO SUTVARKYMO REGLAMENTAVIMO IR PASAULINĖS PRAKTIKOS ANALIZĖ 13

1.1. Radioaktyviųjų atliekų susidarymas 13

1.2 Saugaus radioaktyviųjų atliekų tvarkymo reglamentavimas 17

1.3. Giluminio radioaktyviųjų atliekų atliekyno sistemos dalys 20

1.3.1. Radioaktyviųjų atliekų pakuotės 20

1.3.2. Inžineriniai barjerai 22

1.3.3. Giluminio atliekyno geologinė aplinka 23

1.4. Giluminio atliekyno sistemos saugos funkcijos. 24

1.5. Geologiniai tyrimai giluminio atliekyno vietos parinkimo procese 25

1.6. Giluminių radioaktyviųjų atliekų atliekynų įrengimo pasaulinės praktikos analizė 28

1.7. Potencialios geologinės formacijos giluminio atliekyno įrengimui 44

1.8. Lietuvos potencialių geologinių formacijų slūgsojimo sąlygų apžvalga 45

1.9. Duomenys Lietuvos potencialių geologinių formacijų vertinimui 47

2. POTENCIALIŲ GEOLOGINIŲ FORMACIJŲ TINKAMUMO GILUMINIO ATLIEKYNO ĮRENGIMUI VERTINIMO METODIKOS SUKŪRIMAS 52

2.1. Tinkamumo vertinimo metodikos sukūrimo principai 52

2.2. Potencialių geologinių formacijų tinkamumo kriterijai 53

2.2.1. Kriterijų nustatymas 53

2.2.2. Vertinimo kriterijų reikšmingumo grupės 57

2.2.3. Kriterijų reikšmingumo nustatymas grupėse 64

2.2.4. Geologinės formacijos tinkamumo giluminio radioaktyviųjų atliekų atlietkyno įrengimui skaičiavimo matrica 66

2.3. Lietuvos potencialių geologinių formacijų tinkamumas giluminio atliekyno įrengimui 71

2.3.1. Formacijų tinkamumo vertinimas 72
2.3.2. Formacijų tinkamumo palyginimas 80
3. SAVYBIŲ PROCESŲ IR REIŠKINIŲ SISTEMINIMAS, ANALIZĖ IR TYRIMAS 83
3.1. Savybių, procesų ir reiškinių sąvadai 83
3.2. Svarbiausi nepažeistos geologinės aplinkos SPR 91
3.2.1. Medžiagų pernašos procesai 91
3.2.2. Formacijos ir aplinkinių sluoksnių dydis, geometrija, migracijos kelių ilgis. 92
3.2.3. Trūkstama informacija SPR vertinimui 94
3.2.4. Sluoksnių filtracinės savybės 95
3.2.5. Potencialių formacijų hidrogeologinės sąlygos 96
3.2.6. Difuzijos procesas 98
3.2.7. Atvirasis matricos poringumas 98
3.2.8. Jonų išsiskyrimas 99
3.2.9. Radionuklidų sklaidos sulėtinimo procesai 99
3.2.10. Mažai laidžių uolienų porų tirpalai 108
3.3 Giluminio atliekyno sistemos supratimas ir nepriklausomi metodai prognostinių modelių sudarymui 110
3.3.1 Potencialių geologinių formacijų paleohidrogeologija 110
3.3.2. Porų fliuidų raida 111
IŠVADOS 115
LITERATŪROS SĄRAŠAS 116
SUMMARY 125
GYVENIMO APRAŠYMAS 154
PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS 155

ĮVADAS

Tyrimo tikslas – sukurti geologinių sąlygų tinkamumo radioaktyviųjų atliekų giluminio atliekyno įrengimui vertinimo metodiką ir nustatyti jos taikymo galimybes Lietuvos sąlygomis.

Tyrimo objektas – darbe nagrinėjamos Lietuvos teritorijos geologinę aplinką sudarančių uolienų slūgsojimo sąlygos, savybės, procesai ir reiškiniai, lemiantys geologinės aplinkos tinkamumą saugaus giluminio radioaktyviųjų atliekų atliekyno įrengimui. Darbe analizuojami potencialių geologinių formacijų tinkamumo kriterijai, jų svarba ir įvertinimo galimybės. Sisteminės analizės ir daugiakriterinio vertinimo pagrindu sukuriama Lietuvos sąlygoms pritaikoma geologinės formacijos tinkamumo vertinimo metodika, pagal kurią vertinamos kelios tinkamiausios giluminio atliekyno įrengimui Lietuvos potencialios geologinės formacijos.

Darbo problematika

Nuo 1983 iki 2009 metų Lietuvoje veikiant Ignalinos atominei elektrinei susidarė didelis kiekis radioaktyviųjų atliekų, kurios yra pavojingos aplinkai ir žmonių sveikatai. Lietuvos teisės aktuose ir tarptautiniuose įsipareigojimuose reikalaujama, kad labai radioaktyvios ilgaamžės atliekos turi būti padėtos į giluminį atliekyną. Svarbiausias radioaktyviųjų atliekų giluminio atliekyno ilgalaikę saugą lemiantis veiksnys yra tinkama geologinė aplinka, tačiau nėra metodikos jos tinkamumui įvertinti.

Lietuvoje vis dar yra atliktas tik itin mažas kiekis tiesioginių potencialiai tinkamų giluminiam atliekynui geologinių formacijų tyrimų, kurių rezultatai galėtų būti panaudoti šių formacijų tinkamumo vertinimui.

Darbo uždaviniai

Esamų duomenų apie Lietuvos teritorijoje slūgsančias potencialias geologines formacijas giluminio radioaktyviųjų atliekų atliekyno įrengimui analizė.

Potencialių geologinių formacijų tinkamumo vertinimo kriterijų nustatymas ir pagrindimas.

Potencialių geologinių formacijų tinkamumo vertinimo metodikos sukūrimas.

Keleto potencialių geologinių formacijų: kristalinio pamato uolienų, apatinio kambro molio ir apatinio triaso molio, įvertinimas pagal sukurtą metodiką.

Potencialių geologinių formacijų, pasižyminčių didžiausiu tinkamumu GA įrengimui, uolienų kerno laboratorinių tyrimų, kurių rezultatai gali būti panaudoti šių formacijų tinkamumui palyginti, atlikimas.

Darbo mokslinis naujumas

Sukurta nauja Lietuvos potencialių geologinių formacijų tinkamumo saugaus giluminio radioaktyviųjų atliekų atliekyno įrengimui vertinimo metodika, apimanti tiek kiekybinius, tiek kokybinius kriterijus. Metodika sukurta apjungiant sisteminės analizės ir daugiakriterinio hierarchinio vertinimo principus. Pagal sukurtą metodiką atliktas Lietuvos potencialių geologinių formacijų tinkamumo GA įrengimui vertinimas.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Sukurta metodika gali būti taikoma esamomis sąlygomis panaudojant turimą duomenų kiekį Lietuvoje ir suteikti galimybę tolimesnius tyrimus koncentruoti į didžiausiu tinkamumu pasižyminčios tinkamiausios potencialios geologinės formacijos detalų apibūdinimą.

Įvertinus geologinę aplinką pagal nustatytus kriterijus, sukurta metodika gali būti pritaikoma ir kitų šalių sąlygomis.

Sukurta potencialių geologinių formacijų tinkamumo vertinimo giluminio radioaktyviųjų atliekų atliekyno įrengimui metodika ir šiame darbe pateikiami geologinių tyrimų rezultatai gali būti panaudoti tiriant galimybes saugiai sutvarkyti ilgaamžes radioaktyviąsias atliekas Lietuvoje.

Ginamieji teiginiai

1. Skirtingų potencialių geologinių formacijų tinkamumas giluminio radioaktyviųjų atliekų atliekyno įrengimui gali būti įvertintas, sukūrus sistemine analize ir daugiakriteriniu vertinimu pagrįstą metodiką.

2. Geologinių formacijų tinkamumo giluminio atliekyno įrengimui vertinimo metodika turėtų būti pritaikoma Lietuvos sąlygomis.

3. Geologinių formacijų tinkamumas giluminio atliekyno įrengimui turi būti vertinamas panaudojant nacionaliniais ir tarptautiniais reikalavimais ir pasauline praktika pagrįstus kriterijus.

4. Kiekybinis geologinių formacijų tinkamumo giluminio atliekyno įrengimui vertinimas turi būti atliekamas tik remiantis tiesioginiais šių formacijų savybių, procesų ir reiškinių tyrimų rezultatais.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra publikuoti 2 straipsniai recenzuojamuose moksliniuose žurnaluose. Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti pranešimuose trijose mokslinėse konferencijose.

Darbo struktūra

Darbą sudaro įvadas, trys dalys teksto - radioaktyviųjų atliekų tvarkymo reglamentavimo ir pasaulinės praktikos analizė, potencialių geologinių formacijų tinkamumo vertinimo giluminio atliekyno įrengimui metodikos sukūrimo ir panaudojimo aprašymas, savybių, procesų ir reiškinių sisteminimas, analizė ir tyrimas); išvados, literatūros sąrašas, santrauka anglų kalba, autorės gyvenimo aprašymas, publikacijų disertacijos tema sąrašas.

1. RADIOAKTYVIŲJŲ ATLIEKŲ GALUTINIO SUTVARKYMO REGLAMENTAVIMO IR PASAULINĖS PRAKTIKOS ANALIZĖ

1.1 Radioaktyviųjų atliekų susidarymas

Nuo 1954 metų visame pasaulyje elektros energijai gaminti veikia atominės elektrinės. Šiuo metu atominės elektrinės 32 šalyse generuoja apie 10 % visos pasaulio elektros energijos. Nors ši gamyba sąlygoja palyginti mažą oro taršą, ji generuoja radioaktyviąsias atliekas (toliau - RA), kurios yra vienos pavojingiausių atliekų žmogaus gyvenamajai aplinkai. Nuo pat atominių elektrinių eksploatavimo pradžios visame pasaulyje yra siekiama sutvarkyti RA taip, kad jos nekeltų pavojaus žmonėms šiuo metu ir ateityje. Šiam tikslui yra atliekami moksliniai tyrimai, vykdomas griežtas šių atliekų tvarkymo reglamentavimas tiek nacionaliniu, tiek tarptautiniu lygmeniu. Pagal radioaktyviosios spinduliuotės intensyvumą RA yra skirstomos į mažo, vidutinio ir didelio aktyvumo atliekas. Pagal radionuklidų spinduliavimo laiką RA yra trumpaamžės ir ilgaamžės. Atominėse elektrinėse susidaro įvairios RA. Didelio aktyvumo RA ir vidutinio aktyvumo ilgaamžių RA galutiniam sutvarkymui yra planuojami giluminiai atliekynai (toliau - GA).

Pagrindinis radioaktyviųjų atliekų susidarymo šaltinis Lietuvoje yra Ignalinos atominė elektrinė (toliau – IAE). Joje susidaro daugiau kaip 99,9 % visų radioaktyviųjų atliekų. Radioaktyviosios atliekos Lietuvoje taip pat susidaro naudojant radioaktyviuosius šaltinius ir medžiagas gydymo įstaigose, mokslinėse laboratorijose bei pramonėje.

IAE yra Šiaurės rytinėje Lietuvos dalyje, prie Drūkšių ežero. Jos projektavimo darbai pradėti 1972 m., pirmasis blokas pradėjo veikti 1983 m., antrasis - 1987 m. IAE buvo eksploatuojami RBMK-1500 tipo reaktoriai, kurių bendras elektrinis galingumas - 2600 MW, šiluminis - 8400 MW. Pirmasis reaktorius buvo uždarytas 2004 metais, o antrasis – 2009. Įvairaus radioaktyvumo RA elektrinėje kaupėsi jos eksploatavimo metu ir po uždarymo, kai panaudotas branduolinis kuras (toliau - PBK) buvo išimamas iš reaktorių, demontuojami gamybiniai įrenginiai ir statiniai. Nors atominės elektrinės reaktoriai sustabdyti jau daugiau kaip prieš 15 metų, radioaktyviosios atliekos vis dar tvarkomos ir jų tvarkymo procesas tęsis iki visiško elektrinės eksploatavimo nutraukimo. Skaičiuojama, jog jėgainės išmontuotinos įrangos ir jai priskiriamų medžiagų kiekis yra apie 180 tūkst. tonų, o iš jų beveik 90 % yra užteršta radionuklidais. Didelė dalis susidarančių atliekų yra išvalomos nuo radioaktyvaus užterštumo ir grąžinamos į rinką kaip antrinės žaliavos (siekiamybė išvalyti ir grąžinti 75 % jėgainės įrangą sudarančių medžiagų). Tačiau likusi dalis turi būti supakuota bei padėta į

specialius atliekynus *(https://altra.lt/veikla/radioaktyviuju-atlieku-tvarkymas/2025-12-28)*.

IAE RA yra skirstomos pagal radionuklidų pusėjimo laiką - trumpaamžės ir ilgaamžės, ir radioaktyviosios spinduliuotės intensyvumą - nekontroliuojamos, labai mažai radioaktyvios, mažai radioaktyvios, vidutiniškai radioaktyvios, labai radioaktyvios.

- Labai mažai radioaktyvios yra atliekos, kurių radionuklidai palyginti greitai suskyla ir daugiau nedaro poveikio aplinkai. Tokių atliekų jonizuojančioji spinduliuotė iki nekenksmingos žmogui ir aplinkai sumažėja per maždaug 100 metų.

- Mažo ir vidutinio aktyvumo trumpaamžių RA jonizuojančioji spinduliuotė iki nekenksmingos žmogui ir aplinkai sumažėja per maždaug 300 metų.

- PBK ir kitos labai radioaktyvios ilgaamžės atliekos gali išlikti pavojingos ir 100 tūkstančių metų. Šioms atliekoms saugoti yra būtini specialūs radiacinės saugos inžineriniai barjerai.

Radioaktyvumą apsprendžia IAE tvarkomų atliekų sudėtyje esantys šie radionuklidai: chromas (Cr-51); manganas (Mn-54 ir Mn-56); geležis (Fe-59); kobaltas (Co-60 ir Co-58); cinkas (Zn-65); cirkonis (Zr-95); niobis (Nb-95); molibdenas (Mo-99); cezis (Cs-137, Cs-136 ir Cs-134); jodas (I-131); lantanas (La-140); volframas (W-187).

Lietuvoje kietųjų RA klasifikacija yra patvirtinta Valstybinės atominės energijos saugos inspekcijos (toliau - VATESI) Branduolinės saugos reikalavimais BSR-3.1.2-2017 „Radioaktyviųjų atliekų tvarkymas branduolinės energetikos objektuose iki jų dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną“ (1 lentelė).

1 lentelė. Kietųjų radioaktyviųjų atliekų radiologinė klasifikacija.

RA klasės	**Apibrėžimas**	**Santrumpa**	**Paviršinė dozės galia, mSv/h**	**Galutinis RA apdorojimas**	**Dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną būdas***
1	2	3	4	5	6
0	Nebekontroliuojamos atliekos	NA	-	Nereikalaujamas	Tvarkomos ir šalinamos vadovaujantis Reikalavimų 3.11 papunktyje nurodyto teisės akto nustatytais reikalavimais
Trumpaamžės labai mažai, mažai ir vidutiniškai radioaktyvios atliekos**					
A	Labai mažai radioaktyvios atliekos	LMRA	<0,2	Nereikalaujamas	Paviršiniame (Labai mažai radioaktyvių atliekų) atliekyne
B	Mažai radioaktyvios atliekos	MRA-TA	0,2–2	Reikalaujamas	Paviršiniame radioaktyviųjų atliekų atliekyne
C	Vidutiniškai radioaktyvios atliekos	VRA-TA	>2	Reikalaujamas	Paviršiniame radioaktyviųjų atliekų atliekyne
Ilgaamžės mažai ir vidutiniškai radioaktyvios atliekos***					
D	Mažai radioaktyvios atliekos	MRA-IA	<10	Reikalaujamas	Paviršiniame radioaktyviųjų atliekų atliekyne (ertmės vidutiniame gylyje)
E	Vidutiniškai radioaktyvios atliekos	VRA-IA	>10	Reikalaujamas	Giluminiame radioaktyviųjų atliekų atliekyne

Labai radioaktyvios atliekos					
1	2	3	4	5	6
G	Labai radioaktyvios atliekos	LRA	-	Reikalaujamas	Giluminiame radioaktyviųjų atliekų atliekyne
Panaudoti uždarieji šaltiniai					
F	Panaudoti uždarieji šaltiniai	PUŠ	-	Reikalaujamas	Paviršiniame arba giluminiame radioaktyviųjų atliekų atliekyne ****

* Dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną būdas nustatomas atsižvelgiant į radioaktyviųjų atliekų pakuočių atitiktį priėmimo į konkretų radioaktyviųjų atliekų atliekyną kriterijams.

** Turinčios alfa spinduolių, kurių pusėjimo trukmė ilgesnė nei ^{137}Cs pusėjimo trukmė ir savitasis aktyvumas, išmatuotas ir (arba) apskaičiuotas naudojant aprobuotus metodus, atskiroje radioaktyviųjų atliekų pakuotėje neviršija 4000 Bq/g, su sąlyga, kad pagal visas radioaktyviųjų atliekų pakuotes apskaičiuotas vidutinis šių alfa spinduolių savitasis aktyvumas neviršija 400 Bq/g. Alfa, beta ir (arba) gama spinduolių aktyvumas turi neviršyti paviršinio radioaktyviųjų atliekų atliekyno radioaktyviųjų atliekų priėmimo kriterijuose nustatytų verčių.

*** Turinčios alfa spinduolių, kurių pusėjimo trukmė ilgesnė nei ^{137}Cs pusėjimo trukmė ir savitasis aktyvumas, išmatuotas ir (arba) apskaičiuotas naudojant aprobuotus metodus, atskiroje radioaktyviųjų atliekų pakuotėje viršija 4000 Bq/g, taip pat jeigu pagal visas radioaktyviųjų atliekų pakuotes apskaičiuotas vidutinis šių alfa spinduolių savitasis aktyvumas viršija 400 Bq/g ir (arba) alfa, beta ir (arba) gama spinduolių aktyvumas viršija paviršinio radioaktyviųjų atliekų atliekyno radioaktyviųjų atliekų priėmimo kriterijuose nustatytas vertes.

**** Priklausomai nuo priėmimo kriterijų panaudotiems uždariesiems šaltiniams.

1983–2009 metais Lietuvoje eksploatuojant IAE susidarė didelis kiekis PBK ir RA. 2022 m. duomenimis, numatomas radioaktyviųjų atliekų kiekis, kuris turės būti patalpintas į GA – 2416 tHM (tonų sunkiųjų metalų) PBK bei apie 10 tūkst. tonų kitų ilgaamžių radioaktyviųjų atliekų. Šioms atliekoms priskiriamos metalinės reaktorių konstrukcijos, kuro rinklių dalys, valdymo strypai bei kitos ilgaamžės RA. Pažymėtina, kad numatomas RA kiekis yra apytikris, kadangi IAE pastatų ir įrenginių išmontavimo metu susidarysiančių atliekų kiekis gali būti tik preliminariai numatomas (https://altra.lt/, 2026).

Radioaktyviosios atliekos yra tvarkomos radioaktyviųjų atliekų tvarkymo įrenginiuose. Lietuvoje RA tvarkymo uždaviniai yra sprendžiami nuo IAE eksploatavimo pradžios devintajame praeito amžiaus dešimtmetyje. Pastaraisiais dešimtmečiais atliekami ir geologiniai tyrimai, kurių tikslas yra išaiškinti saugaus ilgaamžių RA padėjimo į GA galimybes. Atliekant tokius

geologinius tyrimus pirmiausiai susiduriama su metodikų trūkumu. Nors remiantis įvairių mokslinių tyrimų rezultatais ir gerąja pasauline praktika RA tvarkymą pasauliniu mastu reglamentuoja Tarptautinės atominės energijos agentūros (toliau - TATENA) reikalavimai, RA tvarkymo ir įvairių tyrimų metodus rekomenduoja TATENA rekomendacijos, tačiau GA įrengimas ir šiam tikslui reikalingi tyrimai labai priklauso nuo teritorijos gamtinių, socialinių ir net politinių sąlygų. Geologiniai tyrimai GA įrengimui yra ilgalaikiai, todėl reikalauja pastovaus, dešimtmečius trunkančio finansavimo, aukštus pasaulio standartus atitinkančių technologijų taikymo, aukštos tyrimus atliekančių organizacijų ir specialistų kvalifikacijos ir aiškaus šių tyrimų metodinio pagrindimo.

1.2 Saugaus radioaktyviųjų atliekų tvarkymo reglamentavimas

Pagrindinis saugos tikslas – apsaugoti žmones ir aplinką nuo jonizuojančiosios spinduliuotės žalingo poveikio. Pagrindiniai GA viso gyvavimo ciklo radiacinės saugos reikalavimai yra nurodyti pasaulinės organizacijos TATENA saugos pagrinduose (IAEA, 2006) ir reikalavimuose (IAEA, 2011 b). Dokumentuose įtvirtinta, kad bendra, įvairių šaltinių sukeliama, efektyvioji dozė visuomenei per visą laikotarpį negali viršyti 1 mSv per metus, o GA sukeliama dozė yra apribota iki 0,3 mSv per metus, kas atitinka 10^{-5} eilės riziką. Tokia rizika reiškia nuo 1 iki 9 iš 10 000 mirtino vėžio ar apsigimimo atvejį.

Europoje 1957 m. kovo 25 d. pasirašyta Europos atominės energijos bendrijos (EAEB arba Euratomas) steigimo sutartis. Pagrindiniai Euratomo sutarties tikslai buvo:

- skatinti mokslinius tyrimus ir skleisti techninę informaciją,
- nustatyti vienodus saugumo normatyvus, kad būtų galima apsaugoti visuomenę ir pramonės darbuotojus,
- sudaryti palankias sąlygas moksliniams tyrimams,
- užtikrinti, kad civilinėms reikmėms naudojamos atominės medžiagos nebūtų naudojamos kitais, visų pirma kariniais tikslais.

Euratomo sutarties pagrindu vėliau buvo patvirtinta visa eilė Europos tarybos direktyvų, skirtų darbuotojų ir gyventojų apsaugai nuo jonizuojančios spinduliuotės, saugiam radioaktyvių medžiagų gabenimui, galimai radioaktyvių kasybos atliekų tvarkymui, keitimuisi naujausiais mokslinių tyrimų duomenimis ir kt.

Remdamasi tarptautinėmis sutartimis, konvencijomis ir galiojančiomis direktyvomis 2011 metų liepos 19 d. Europos Sąjungos Taryba priėmė direktyvą 2011/70/EURATOMAS (toliau - Direktyva 70), kuria nustatoma panaudoto branduolinio kuro (toliau - PBK) ir radioaktyviųjų atliekų atsakingo ir saugaus tvarkymo Bendrijos sistema. Ši direktyva

įpareigoja visas šalis nares parengti ir įgyvendinti nacionalines PBK ir RA tvarkymo programas.

Lietuvoje šiuo metu galioja visa eilė branduolinės energetikos saugą užtikrinančių ir valstybės tarptautinius įsipareigojimus įgyvendinančių teisės aktų. Pagrindinis RA tvarkymą reglamentuojantis teisės aktas Lietuvoje yra Lietuvos Respublikos radioaktyviųjų atliekų tvarkymo įstatymas. Jame yra apibrėžiamos pagrindinės RA tvarkyme vartojamos sąvokos, RA tvarkymo procese dalyvaujančių organizacijų teisės, pareigos, pagrindiniai RA tvarkymo principai. Šeštasis šio įstatymo skirsnis reglamentuoja RA tvarkymo įrenginių, tarp jų ir atliekynų, aikštelių parinkimą, projektavimą, statybą ir privalomą saugos vertinimą. Įstatyme nurodyta, kad parenkant aikštelę RA tvarkymo įrenginiui, t. y. ir GA, yra privaloma įvertinti visus svarbius su aikštele susijusius veiksnius, kurie gali turėti įtakos šio įrenginio saugai per visą jo eksploatavimo laikotarpį ir jo saugai po uždarymo. Projektuojant ir statant radioaktyviųjų atliekų tvarkymo įrenginį, turi būti numatomas pakankamas kiekis radionuklidų barjerų ir taikomos apsaugos priemonės, ribojančios galimą jonizuojančiosios spinduliuotės, įskaitant kontroliuojamą ir nekontroliuojamą radionuklidų išmetimą į aplinką, poveikį atskiriems asmenims, visuomenei ir aplinkai; naudojamos technologijos, pasitvirtinusios praktiškai arba patvirtintos bandymais ar analize Lietuvos Respublikoje ar kitose valstybėse; parengtos įrenginio uždarymo techninės sąlygos. Įgyvendinant šį įstatymą ir vadovaujantis Direktyva Lietuvoje 2014–2021 metų laikotarpiu RA tvarkymas buvo vykdomas pagal RA tvarkymo plėtros programą. Šiuo metu galioja Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2021 m. vasario 3 d. nutarimu Nr. 76 patvirtinta „2021–2030 metų branduolinės energetikos objektų eksploatavimo nutraukimo ir radioaktyviųjų atliekų tvarkymo plėtros programa“ (toliau – Plėtros programa), kurios priemonė Nr. 5 nurodo galutinai sutvarkyti ilgaamžes RA ir numato GA vietos parinkimo tyrimų programą įvykdyti iki 2047 metų. Plėtros programoje preliminariai planuojama, kad GA bus statomas 2058–2067 metais, eksploatuojamas 2068–2074 metais, uždaromas 2075–2079 metais, ir šiam tikslui numatomi finansiniai ištekliai.

Siekiant apsaugoti aplinką ir žmones nuo galimos radioaktyviosios spinduliuotės, tvarkant RA ir jas sutvarkius, vadovaujantis TATENA reikalavimais ir rekomendacijomis (IAEA, 2011 a; IAEA, 2011 b) Lietuvoje yra parengti branduolinės saugos reikalavimai BSR-3.2.2-2016 „Radioaktyviųjų atliekų atliekynai“, patvirtinti Valstybinės atominės energetikos saugos Inspekcijos viršininko 2016 m. lapkričio 30 d. įsakymu Nr. 22.3-188. Šiais reikalavimais yra patvirtinta GA sąvoka, nurodanti, kad „Giluminis radioaktyviųjų atliekų atliekynas – stabilioje geologinėje formacijoje kelių šimtų metrų arba didesniame gylyje esantis RA atliekynas, skirtas ilgaamžėms ir (arba) labai radioaktyvioms atliekoms dėti“. Šiuose

reikalavimuose apibrėžiami pagrindiniai visų RA atliekynų aikštelių parinkimo principai ir nurodoma, kad „aikštelė parenkama, atliekyno projektiniai sprendiniai ir eksploatavimo normatyviniai techniniai dokumentai rengiami taip, kad sauga po atliekyno uždarymo būtų užtikrinama daugialypėmis saugos funkcijomis, įskaitant radionuklidų barjerų sistemas. Radionuklidų barjerų gebėjimas sulaikyti radionuklidus turi būti grindžiamas skirtingomis jų savybėmis, o atliekyno sauga neturi priklausyti nuo vienos atskiros saugos funkcijos. Radionuklidų sulaikymas giluminiame atliekyne turi būti užtikrinamas, visų pirma, geologinės formacijos savybėmis".

Pagal TATENA saugos reikalavimus (IAEA, 2011 b) ir saugos vadovų (IAEA, 2011 a) rekomendacijas yra skiriami 3 pagrindiniai GA programų įgyvendinimo etapai. Šie etapai dar vadinami GA gyvavimo etapais.

Pirmasis etapas vadinamas priešeksploataciniu *(angl. pre-operational stage)* etapu. Šis laikotarpis apima sąvokų apibrėžimą, aikštelės tyrimą ir patvirtinimą, saugos vertinimą, vietos parinkimą, projektavimą, tyrimus ir saugos pagrindimo aspektų *(angl. safety case)*, susijusių su sauga GA eksploatacijos metu ir ilgalaike sauga po uždarymo, rengimą. Saugos pagrindimo aspektai yra reikalingi siekiant nustatyti leidimų išdavimo sąlygas GA statybai ir eksploatacijai ir šių leidimų išdavimui. Šio etapo metu rengiamos ir vykdomos tyrimų ir monitoringo programos, kurių įgyvendinimo rezultatai yra būtini sprendimams dėl GA eksploatacijos priimti. Šiame etape turi būti numatomos tyrimų ir monitoringo programų įgyvendinimo sąlygos ir laikas.

Antrasis etapas vadinamas eksploatacijos (*angl. operational)* etapu. Šis etapas prasideda, kai RA pirmą kartą priimamos į GA. Nuo to laiko apšvita gali būti patiriama dėl atliekų tvarkymo veiklos, ir ji turi būti kontroliuojama pagal bendruosius saugos ir radiacinės saugos reikalavimus. Monitoringo (stebėsenos), priežiūros ir tyrimų programos ir toliau vykdomos. Jų rezultatai teikia informaciją apie eksploatavimo valdymo sprendimus, jais remiantis priimami sprendimai dėl GA ar jo dalių uždarymo. Saugos pagrindimo aspektai ir saugos vertinimas atnaujinami tolesnei eksploatacijai ir laikotarpiui po GA uždarymo, kad būtų atsižvelgta į faktinę patirtį ir gausėjančias žinias. Eksploatacijos etape kartu su RA dėjimu gali būti vykdomi ir kai kurių GA dalių statybos darbai ar jau užpildytų dalių uždarymas. Tuo pat metu GA gali vykti priemonių RA išėmimui, jei tai numatyta GA programoje, įgyvendinimas. Eksploatavimo etapas tęsiasi iki RA dėjimo užbaigimo ir GA uždarymo.

Trečiasis etapas vadinamas laikotarpiu po GA uždarymo *(angl. post-closure)*. Jis prasideda tada, kai visi inžineriniai saugos barjerai ir kiti RA izoliavimo elementai yra įdiegti, eksploatuoti žemės paviršiuje buvę pastatai ir pagalbiniai įrenginiai yra išmontuoti, ir GA yra galutinės konfigūracijos.

Uždarius GA, jo sauga užtikrinama pasyviomis priemonėmis, kurios priklauso nuo aikštelės, inžinerinių barjerų ir geologinės aplinkos, t. y. GA sistemos, savybių. Organizacinė kontrolė kurį laiką dar gali būti tęsiama, jei, pavyzdžiui, yra reikalingas visuomenės pritarimas. GA licencijos galiojimas yra panaikinamas, kai yra įvykdytos visos būtinos techninės priemonės ir įgyvendinti visi teisiniai ir finansiniai reikalavimai.

TATENA specialiuose techniniuose dokumentuose GA programos įgyvendinimo etapai skirstomi detaliau (IAEA, 2024).

Pagal Lietuvos Respublikos teisės aktus į GA turės būti padėtos ilgaamžės RA ir PBK. Šios atliekos yra kietame būvyje. Ilgaamžės RA prieš dėjimą į GA turi būti apdorotos ir supresuotos. Visos į GA dedamos RA bus supakuotos į specialius konteinerius. Šie konteineriai GA sistemoje sudaro pirmąjį dirbtinį (inžinerinį) radionuklidų sklaidos barjerą.

2022 m. duomenimis, numatomas PBK ir kitų ilgaamžių RA kiekis, kuris turės būti patalpintas į GA yra 2416 tHM (tonų sunkiųjų metalų) PBK bei apie 10 tūkst. tonų kitų ilgaamžių RA. Šioms atliekoms priskiriamos metalinės reaktorių konstrukcijos, kuro rinklių dalys, valdymo strypai bei kitos ilgaamžės radioaktyviosios atliekos. Pažymėtina, kad numatomas radioaktyviųjų atliekų kiekis yra apytikris, kadangi IAE pastatų ir įrenginių išmontavimo metu susidarysiančių atliekų kiekis gali būti tik preliminariai numatomas (*https://www.iae.lt/veikla/giluminis-radioaktyviuju-atlieku-atliekynas/911 2025-04-28)*.

1.3. Giluminio radioaktyviųjų atliekų atliekyno sistemos dalys

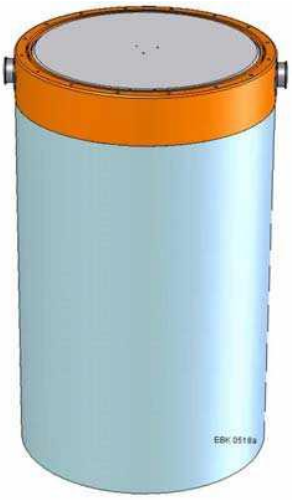
GA sistemą sudaro RA, jų pakuotės, inžineriniai barjerai ir gamtinis barjeras, t.y. parinkta GA formacija ir visa ją supanti geologinė aplinka. Šiame darbe yra vertinamas geologinės aplinkos tinkamumas GA sistemos įrengimui, saugiam naudojimui ir ilgalaikei saugai po uždarymo. Toliau kiekviena šios sistemos dalis apibūdinama detaliau.

1.3.1. Radioaktyviųjų atliekų pakuotės

Ilgalaikiam laikinam saugojimui PBK pluoštai yra pakraunami į saugojimo konteinerius. PBK pluoštams patalpinti konteinerio viduje dedami specialūs kuro krepšiai. Konteineris suprojektuotas kaip daugiapakopė barjerų sistema, kuri užtikrina hermetiškumą ir ilgalaikį PBK saugojimą be jokio planinio įsikišimo per visą saugojimo laikotarpį. IAE yra naudojami CONSTOR® RBMK1500/M2 konteineriai (1 pav.), kurie yra suprojektuoti ilgalaikiam (netrumpesniam kaip 50 metų) RBMK-1500 PBK pluoštų saugojimui.

Laikinosios PBK saugyklos PAV ataskaitos duomenimis (GNS - NUKEM, 2007), apskaičiuota, kad bendrasis PBK, kuris saugomas laikinojoje

saugykloje, aktyvumas bus apie 10^{19} Bq. Tikslesni aktyvumo skaičiavimo rezultatai pateikiami saugos analizės ataskaitose.



1 pav. Bendrasis konteinerio CONSTOR® RBMK1500/M2 vaizdas (NUKEM Technologies GmbH; LEI, 2008).

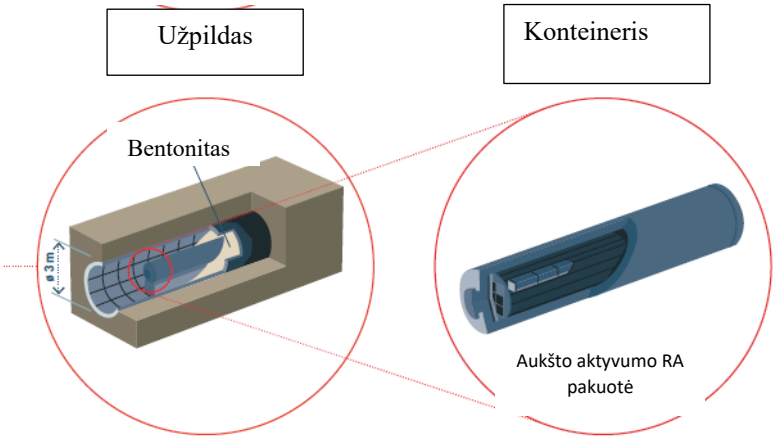
Trumpaamžės RA prieš supakavimą yra presuojamos, siekiant sumažinti jų tūrį (2 pav.). Trumpaamžių RA saugojimui, transportavimui ir dėjimui į atliekynus IAE yra naudojami apie 3,5 m^3 vidinio tūrio betoniniai konteineriai, kartu užtikrinantys apsaugą nuo jonizuojančios spinduliuotės (paruoštos atliekų pakuotės išorinis tūris yra apie 6,4 m^3). Ilgaamžės RA saugomos stačiakampio formos plieniniuose, neekranuojančiuose apie 2,5 m^3 vidinio tūrio konteineriuose (konteinerio išorinis tūris yra apie 4 m). Tokia koncepcija pasirinkta siekiant sumažinti ilgaamžių atliekų tarpinės saugyklos gabaritus. Kadangi konteineris jonizuojančios spinduliuotės neekranuoja, tai saugyklos sienos yra atitinkamai suprojektuotos, atsižvelgiant į radiacinės apsaugos reikalavimus. Dėjimui į GA ilgaamžės RA turės būti patalpintos į betoninius konteinerius, kurių parametrai priklausys nuo GA koncepcijos.



2 pav. Supresuotos atliekų statinės (GNS - NUKEM, 2007).

1.3.2. Inžineriniai barjerai

Dedant RA į atliekyną aplink jų pakuotes yra sukuriami papildomi inžineriniai barjerai, papildantys radionuklidų sulaikymo ir jų sklaidos sulėtinimo funkciją. Ertmėse tarp RA pakuočių talpinama itin mažai laidi medžiaga, kuri vadinama buferiu (*angl. - buffer*). Padėjus RA pakuotes, visi tuneliai, gręžiniai, šachtos yra užpildomi radionuklidus sulaikančia ir kartais mechaninį stabilumą padidinančia medžiaga, kuri yra vadinama užpildu (*angl backfill*). Buferio medžiaga dažniausiai yra gaminama iš bentonito ir įvairių priedų. Užpildo medžiaga gaminama taip, kad kuo daugiau galimai pasklisiančių radionuklidų būtų sulaikomi dėl itin mažo laidumo dujoms ir skysčiams; kad šie nuklidai būtų absorbuojami užpildo dalelių paviršiuje ar surišami katijonų mainų dėka; kad plyšiai tarp RA pakuočių ir tunelių sienelių būtų užpildyti šio inžinerinio barjero medžiaga (3 pav.). Ertmės tarp RA pakuočių ir GA tuneliai gali būti užpildomi ta pačia inžinerinio barjero medžiaga arba skirtinga. Tai priklauso nuo GA koncepcijos ir saugos reikalavimų.



3 pav. RA pakuotės su inžineriniais barjerais pavyzdys (NAGRA, 2022 a).

1.3.3. Giluminio atliekyno geologinė aplinka

Geologinė aplinka GA sistemoje sudaro artimąjį lauką ir tolimąjį lauką.

Artimasis laukas yra geologinės formacijos dalis, tiesiogiai susijusi su GA įrenginiais ir dažniausiai apima kasybos pažeistą (*angl EDZ*) zoną. Artimajame lauke geologinės formacijos savybės yra pakitusios, įtakotos GA įrengimo. Uoliena šiame lauke paprastai yra labiau plyšiuota dėl šachtų ir tunelių gręžimo poveikio, o ties tunelių sienomis joje formuojasi oksidacijos sluoksnis dėl tunelių vėdinimo. Artimajame lauke geologinėje formacijoje vyksta GA įrengimo ir naudojimo įtakoti cheminiai, temperatūriniai, hidrauliniai ir mechaniniai pokyčiai, kurie trumpiau vadinami termohidromechaniniais. Orui patenkant į GA artimąjį lauką, yra sukuriamos laikinos oksidacinės sąlygos, kurios smarkiai paveikia uolienos oksidacinį-redukcinį potencialą ir pH. Dėl to pakinta galimų teršalų tirpumas, pagreitėja GA statybai naudojamo plieno korozija ir gali atsirasti uolienos mineraloginės sudėties pokyčių. Tai ypač būdinga uolienoms, kuriose yra pirito, organinės medžiagos ir kitų dvivalentės geležies turinčių mineralų. Artimąjį lauką sudarančioje geologinėje aplinkoje vyksta uolienos ir šarminių fliuidų (pH > 10,5) sąveika, kuri pasireiškia jonų mainais, mineralų tirpimu ir kristalizacija, dėl ko gali pasikeisti GA aplinkos sorbcinės savybės, požeminio vandens srautas, difuzija. Cheminių reakcijų greitis ir pusiausvyra artimajame GA sistemos lauke kinta dėl temperatūros pokyčių. Kylant temperatūrai didėja daugumos kietųjų medžiagų tirpumas, mažėja daugumos dujų tirpumas ir didėja daugumos cheminių reakcijų greitis. Temperatūros pokyčiai lemia

uolienos porų tirpalų cheminės sudėties ir uolienos mineraloginės sudėties pasikeitimus. Talpinančios uolienos konsolidacija dėl temperatūros poveikio yra susijusi su GA patalpintų šaltinių šilumos sklaida ir su nuo laiko priklausančia sąveika tarp kietųjų dalelių ir tirpalų.

Tolimąjį lauką sudaro GA įrengimo nepažeista geologinės formacijos dalis ir ją supanti visa geologinė aplinka. Tolimajame lauke uolienos pasižymi gamtinėmis savybėmis, jame vyksta gamtiniai procesai, formuojasi gamtiniai reiškiniai. Tolimojo lauko pokyčiai yra susiję su natūraliai vykstančia žemės paviršiaus erozija (viršutinių uolienų sluoksnių nuardymas dėl upių, vėjo, ledynų ar jūros veiklos), tektoninėmis geologinės formacijos slūgsojimo sąlygomis (kilimas, grimzdimas), klimatinėmis teritorijos sąlygomis (temperatūra, krituliai, ledynų apkrova). Šie pokyčiai yra ilgalaikiai ir, planuojant GA įrengimą turi būti prognozuojami priklausomai nuo saugos vertinimo reikalavimų 10 ar 100 tūkstančių metų laikotarpiui.

1.4. Giluminio atliekyno sistemos saugos funkcijos.

- Uždarumo funkcija (angl. *containment*) užtikrina RA fizinį įtvirtinimą tam tikroje formoje. Pagrindinis GA sistemos elementas, kuriam priskiriama ši funkcija, yra RA pakuotė ir konteineris.

- Izoliavimo nuo prieinamos biosferos funkcija yra priskiriama pakankamo storio geologinei aplinkai, kuri dengia GA ir apsaugo nuo žemės paviršiuje vykstančių žalingų gamtinių ar žmogaus sukeltų procesų.

- Sulaikymo ir sulėtinimo funkcija (angl. *retention, retardation*) užtikrina lėtą radionuklidų sklaidą iš GA. Ši funkcija priskiriama inžineriniams barjerams GA tuneliuose, artimojo ir tolimojo lauko geologinei aplinkai.

- Stabilumo funkcija užtikrina GA sistemos ilgalaikį fizinį, cheminį ir mechaninį stabilumą. Ši funkcija priskiriama inžinerinėms GA konstrukcijoms ir geologinei aplinkai.

Izoliacija reiškia, kad tuneliai ir radionuklidus sulaikanti geologinio barjero dalis yra pakankamai giliai, kad RA būtų apsaugotos nuo žalingų procesų, vykstančių paviršiuje. Be to, izoliacija reikalauja, kad GA būtų įrengtas vietovėje, kurioje yra mažas žmogaus įsibrovimo pavojus, taigi, palyginti su kitose šalies vietovėse esančiais žemės gelmių ištekliais, ištekliai GA vietoje turėtų būti nereikšmingi. Sauga užtikrinama atliekų konteineriu tam tikrą laikotarpį. Radionuklidų sulaikymas ir sulėtinimas po konteinerio pažeidimo užtikrinamas UO_2 matrica (naudoto branduolinio kuro atveju), buferiu ir, jei yra tinkama uoliena, aplinkine geologija. Kai GA yra kristalinėje uolienoje, didelio aktyvumo RA konteineris yra svarbiausias GA sistemos

barjeras, kitaip nei molingose uolienos. Stabilumas susijęs su ilgalaike geologine evoliucija, klimato poveikiu ir įvairių GA elementų bei medžiagų, įskaitant panaudotą branduolinį kurą ir kitas RA, suderinamumu (atsparumu įvairiems poveikiams). Terminis poveikis yra susijęs su konteinerio šilumos išskyrimu ir aplinkinių medžiagų suderinamumu. Įrengiant GA turi būti siekiama užtikrinti, kad konteinerio šilumos išskyrimas ir jo išorės temperatūra nepakenktų buferio ar netoliese esančios uolienos elgsenai. Hidraulinis poveikis susijęs su masės pernašos sąlygomis į GA ir iš jo, siekiant sudaryti palankias sąlygas konteinerio elgsenai ir sulėtinti bei sulaikyti radionuklidus, jei įvyktų konteinerio pažeidimas. Nepakankamai tinkamos vietos sąlygos gali lemti nepakankamą konteinerio saugos funkciją ir (arba) nepakankamą radionuklidų sulaikymą ir sulėtinimą artimajame ir tolimajame lauke. Mechaniniai poveikiai susiję su geologinės formacijos uolienos savybėmis ir geologinėmis sąlygomis, kurios gali turėti įtakos GA gyliui, pvz., erozijos greitis, seisminis aktyvumas ir mechaniniai įtempiai bei šlyties deformacija, taip pat požeminių tunelių stabilumas, kuris svarbus statybos galimybėms ir eksploatavimo saugai. Cheminiai poveikiai – tai geocheminių sąlygų ir GA sistemos pasirinktų medžiagų suderinamumas, taip pat geologinės formacijos savybės ir geologinės sąlygos, kurios gali pakeisti barjerų elgseną (pvz., konteinerio medžiagos korozijos greitis, radionuklidų sorbcija ir tirpumas).

Galiausiai, GA statyba, eksploatacija ir uždarymas turi būti saugūs ir techniškai įgyvendinami naudojant esamas ir patikrintas technologijas. Tam reikalingi papildomi sistemos elementai, pvz., prieigos tuneliai ar šachtos, kad būtų galima patekti į RA padėjimo tunelius, betoniniai sutvirtinimai, varžtai ir ankeriai tunelių stabilumui užtikrinti ir ventiliacijos sistema, kad būtų užtikrintas eksploatacijos saugumas. (IAEA, 2011 (b)).

Kaip matyti, didžioji dalis GA sistemos saugos funkcijų yra priskiriama artimajam ir tolimajam GA laukui, t. y. geologinei aplinkai. Todėl vieni svarbiausių tyrimų GA įrengimui yra geologiniai tyrimai.

1.5. Geologiniai tyrimai giluminio atliekyno vietos parinkimo procese

GA įrengimas yra sudėtingas ir ilgalaikis procesas, kuris paprastai skirstomas į etapus. Šiame procese skiriami vietos parinkimo, projektavimo, statybos, eksploatavimo, uždarymo, apsaugos po uždarymo etapai. Įgyvendinant GA įrengimo projektus pasaulyje nė vienas GA sistemos elementas nėra vertinamas atskirai. GA sistemos elementų ir juose vykstančių ir numatomų procesų sąveikos pobūdis visuose GA įrengimo etapuose apsprendžia GA įrengimo galimybes ir saugą. GA sistemoje vykstančių procesų, sistemos elementų pokyčių, ir radionuklidų sklaidos prognozavimas yra itin sudėtingas dėl didelio skaičiaus neapibrėžtumų. Todėl visuose GA įrengimo etapuose siekiama šį skaičių kiek įmanoma sumažinti. **Geologiniu**

požiūriu neapibrėžtumai yra sąlygoti uolienų įvairovės pjūvyje ir plote, tektoninių procesų, požeminio vandens dinamikos ir kitų veiksnių. Potenciali aplinka GA įrengimui yra įvardinta daugelyje praeito amžiaus pabaigos literatūros šaltinių. (Chapman et al., 1986, Savage et al., 1995). Daugelyje Europos šalių aptinkami žemyniniai baseinai, jūros link gelmėjančios ar po jūros dugnu slūgsančios nuosėdinės uolienos, mažai laidus kristalinis pamatas po nuosėdine danga, santykinai lygų reljefą formuojančios kristalinės uolienos ir mažos salos yra įvardijamos kaip potencialiai tinkamos GA įrengimui.

Įvairiose pasaulio šalyse įgyvendinant GA projektus yra sprendžiama visa eilė geologinių uždavinių. Vieni jų šiuo metu yra įvardinti TATENA saugos reikalavimuose ir rekomendacijose, o kiti priklauso nuo konkrečių valstybėse įgyvendinamų mokslinių tyrimų programų tikslų. TATENA saugos dokumentuose (IAEA, 2011 a, IAEA, 2011 b) yra nurodyta, kokie geologiniai duomenys turi būti išanalizuoti GA vietos parinkimo procese ir kitose galutinio RA tvarkymo stadijose. Vietos parinkimas GA įrengimui pagal TATENA saugos vadovų nuostatas turėtų būti vykdomas keletu etapų:

1) apžvalginiai tyrimai ir GA koncepcijos (koncepcijų) parengimas *(angl. conceptual (planning) stage)*;

2) regioniniai tyrimai (*angl. area survey stage*);

3) vietos ar keleto alternatyvių vietų tyrimai ir apibūdinimas *(angl. site investigation and characterisation stage);*

Geologiniai tyrimai GA vietos parinkimui yra vykdomi visuose šio proceso etapuose. Šie tyrimai gali apimti keletą etapų arba yra skirti tik vienam etapui ar jo daliai. Geologiniai tyrimai gali būti skirstomi pagal jų mastelį, detalumą ar konkrečius sprendžiamus uždavinius. Pagal detalumą skiriami:

- apžvalginiai tyrimai,
- preliminarūs tyrimai,
- detalūs tyrimai ir
- tyrimai GA iškastoje dirbtinėje požeminėje ertmėje.

Apžvalginių tyrimų tikslas yra surinkti, apibendrinti ir įvertinti archyvinius (fondinius) ir literatūrinius duomenis apie teritorijos geologines, tektonines, seismines, hidrogeologines, inžinerines geologines, ekogeologines ir kt. sąlygas, remiantis TATENA reikalavimais, parinkti geologinę formaciją, kurioje galėtų būti įrengtas GA. Pirmajame geologinių tyrimų GA įrengimui etape – apžvalginiuose tyrimuose – turi būti ištirtas ir įvertintas “tolimasis

laukas". Prieš nusprendžiant tirti šį geologinį barjerą, turi būti atsakyta į šiuos pagrindinius klausimus.

- Kokia geologinio barjero reikšmė GA įrengimui ir RA dėjimo į jį saugai ir kokios šio barjero funkcijos?
- Kokios yra pageidautinos geologinio barjero savybės?
- Kur įmanoma rasti tokį barjerą?
- Kokia yra gero geologinio barjero būtinybė ir, ar negali RA būti dedamos į GA pakankamame gylyje bet kur?

Atsakymai į kai kuriuos šių klausimų yra visiškai aiškūs. Uoliena (geologinis kūnas) izoliuoja atliekas nuo žmogaus gyvenamosios aplinkos ir teikia pakankamą apsaugą nuo atliekų skleidžiamos radiacijos. Tačiau svarbesni geologinio barjero tyrimo aspektai, susiję su RA dėjimu į GA yra:

tai, kad GA atliekos yra nepasiekiamos griaunantiems tiek gamtiniams (žemės drebėjimai, vulkanizmas), tiek technogeniniams reiškiniams (sprogstamųjų užtaisų sprogimo atvejai ir kt.);

tai, kad GA sukuriama aplinka, kurioje atliekas veikiančių gamtinių procesų greičiai yra maži (Savage et al., 1995).

Geologinės aplinkos "tolimojo lauko" vaidmuo izoliuojant RA nuo žmogaus gyvenamosios aplinkos yra dvilypis. Vienos geologinės aplinkos sąlygos didina minėtą izoliaciją, o kitos gali būti jos mažinimo priežastimi. Todėl geologines planuojamo GA sąlygas reikia tirti abiem aspektais.

Preliminarių tyrimų tikslas yra parinktoje geologinėje formacijoje išskirti vietą (sklypą) GA įrengimui. Šiam tikslui geologinėje formacijoje parenkamos kelios galimos GA įrengimo vietos (sklypai). Kiekvienoje iš jų atliekami preliminarūs tyrimai. Atliekant šiuos tyrimus, didžiausias dėmesys turi būti skiriamas tyrimui tų geologinės aplinkos sąlygų, kurios yra lemiamos parenkant vietą GA (geologinė sandara, tektonika, hidrogeologija ir kt.). Remiantis šių tyrimų duomenimis ir lyginant technines - ekonomines sąnaudas, reikalingas GA įrengimui, kiekvienoje iš numatomų vietų (sklypų) parenkamas galutinis optimalus GA vietos variantas. Atliekant preliminarius tyrimus, be archyvinių (fondinių) ir literatūrinių duomenų panaudojimo, reikalui esant, gali būti atliekamas geofizinių-geologinių darbų kompleksas, apimantis lauko ir laboratorinius tyrimus. Šių tyrimų rūšys, metodika ir apimtys turi būti pagrįsti preliminariems tyrimams skirtame projekte.

Detalių tyrimų tikslas - pilnai apibūdinti parinktos statybinės aikštelės inžinerines geologines sąlygas (geologines, tektonines, hidrogeologines ir kt.) ir pateikti būtinus duomenis jos projektavimui. Šiame

etape tiksliai nustatoma GA vieta, gylis, uolienų skaičiuojamieji geotechniniai parametrai, statybos ir kasybos darbų atlikimo sąlygos, numatomi įrengti inžineriniai barjerai, užtikrinantys GA ilgaamžiškumą ir patikimą aplinkos apsaugą. GA statybos metu dar gali būti atliekami papildomi inžineriniai geologiniai tyrimai, kurių tikslas - kai kurių techninių sprendimų patikslinimas. Detalių tyrimų rūšys, metodika, apimtys turi būti pagrįsti ir pateikti šiems tyrimams skirtame projekte. Projektas gali būti sudarytas, tik atlikus pirmuose dviejuose etapuose numatytus darbus ir paaiškėjus, kokioje geologinėje formacijoje bus įrengiamas GA, ir bendrais bruožais apibūdinus GA įrengimui parinkto sklypo inžinerines geologines sąlygas.

Tyrimų iškastoje požeminėje ertmėje tikslas - ištirti GA elgseną realioje geologinėje aplinkoje ir nustatyti parametrų rodiklius, reikalingus GA ilgalaikės saugos vertinimui. Šie tyrimai vykdomi požeminėse laboratorijose, jų rūšys, metodika, apimtys ir trukmė įvertinama atlikus pirmųjų trijų tyrimų etapų darbus.

1.6. Giluminių radioaktyviųjų atliekų atliekynų įrengimo pasaulinės praktikos analizė

Branduolinės energijos agentūra (NEA) veikia pasaulinės ekonominio bendradarbiavimo ir plėtros organizacijos (EBPO) sudėtyje. Pastaruoju metu NEA yra publikavusi daug radioaktyviųjų atliekų tvarkymo praktiką apibendrinančių leidinių. 2020 metais yra publikuotas pasaulinės giluminių atliekynų įrengimo apžvalgos leidinys „Management and Disposal of High-Level Radioactive Waste: Global Progress and Solutions“ (NEA, 2020), kuriame apžvelgiama Suomijos, Prancūzijos, Švedijos, JAV, Kinijos, Kanados, Vokietijos, Šveicarijos ir Japonijos GA įrengimo patirtis ir vykdomos mokslinės programos. Šias šalis galima laikyti labiausiai pažengusiomis GA įrengimo srityje. Jose yra parinktos GA vietos ir įrengtos požeminės tyrimų laboratorijos. Suomijoje jau yra pastatytas GA, kuriam artimiausiu metu bus suteikta eksploatacijos licencija. Švedijoje yra pateikti dokumentai atsakingoms institucijoms tokiai licencijai gauti. Švedijos Aspo požeminė laboratorija jau yra uždaroma, o tyrimai joje nebevykdomi. Įvairūs tyrimai visose šiose šalyse iki sprendimo dėl GA vietos priėmimo truko nuo 29 iki 50 metų.

Kitas svarbus NEA dokumentas yra Tarptautinis savybių procesų ir reiškinių (toliau - SPR) sąvadas, publikuotas 2019 metais *„International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste“. Version 3.0”* (NEA, 2019)1. Šį sąvadą sudaro 5 dalys, kuriose vertinami išoriniai veiksniai, tarp jų ir geologiniai (1 grupė), su atliekų pakuote susiję veiksniai (2 grupė), su atliekynu susiję veiksniai (3 grupė), su geosfera susiję veiksniai (4 grupė) ir su biosfera susiję veiksniai (5 grupė). Rengiant šį darbą analizės metu kai kurie 1, 2 ir 4 grupės veiksnius

apibūdinantys rodikliai buvo įvardinti, kaip Lietuvos GA įrengimui skirti geologiniai kriterijai. Tarptautinis SPR katalogas 2024 buvo atnaujintas, atsižvelgiant į naujus įvairiose šalyse, ypač Švedijoje, atliktus GA programų tyrimus. Be to, katalogas tapo laisvai prieinamas internete (NEA, 2024 (b)).

Saugos standartuose ir rekomendacijose akcentuojamas tarptautinis mokslinis bendradarbiavimas ir dalijimosi gautais tyrimų rezultatais svarba. Tarptautinis mokslinis bendradarbiavimas GA įrengimo srityje yra vystomas daugelio tarptautinių organizacijų, tokių kaip Europos Komisija, Branduolinės energijos agentūra NEA prie EBPO, TATENA ir kt. Tarptautinių organizacijų iniciatyva yra sukurtos įvairių mokslinių tyrimų, skirtų GA projektų įgyvendinimui, rezultatų tarptautinės duomenų bazės. Pastaruoju metu moksliniai tyrimai GA įrengimui dažniausiai vykdomi tarptautinių programų ir projektų apimtyje (pavyzdžiui, EURAD, DECOVALEX, Euridice.be, Cigeo ir kt.). Vykdydamos įvairių sričių tyrimus mokslinės organizacijos jungiasi į konsorciumus ir, priklausomai nuo šalies poreikio, vykdo tyrimus skirtingose šalyse ir požeminėse laboratorijose.

Skirtingos pasaulio šalys yra skirtingoje GA įrengimo programos fazėje. Tyrimai, skirti GA įrengimui, pasaulyje pradėti XX a. aštuntame dešimtmetyje. Anksčiausiai tokius tyrimus pradėjo labiausiai ekonomiškai išsivysčiusios šalys, kuriose branduolinė energija užėmė didžiausią dalį gaminamos ir naudojamos energijos (JAV, Prancūzija, D. Britanija, Japonija, Švedija, Suomija). Be atliekų iš atominių elektrinių ar mokslinės paskirties reaktorių kai kuriose šalyse GA buvo planuojama tvarkyti ir RA, susidarančias karinėje pramonėje (JAV). Kuriant pirmąsias GA programas, TATENA buvo parengti ir pirmieji tarptautiniai reguliavimo dokumentai (IAEA, 1981; IAEA, 2011b), publikuoti moksliniai straipsniai ir jų rinkiniai.

Šiuo metu įvairiose šalyse įgyvendinamas programas (NEA, 2020) galima suskirstyti pagal uolienas, kuriose įrengti ar planuojami GA (2 lentelė).

2 lentelė. Giluminių atliekynų geologinė aplinka šalyse, labiausiai pažengusiose radioaktyviųjų atliekų tvarkymo ir atliekynų programų įgyvendinimo procese.

Eil. Nr.	Šalis	Uoliena	Vystanti organizacija
1.	Suomija	Granitas - gneisas	Posiva Oy
2.	Švedija	Granitas	SKB
3.	Kanada	Granitas, molis	NWMO
4.	Japonija	Granitas	NUMO
5.	Prancūzija	Molis	ANDRA
6.	Belgija	Molis	ONDRAF-NIRAS
7.	Šveicarija	Molis	NAGRA
8.	JAV	Druska	US dept. of Energy (DOE), SIMCO

Suomija

Suomija eksploatuoja 5 branduolinius reaktorius dviejose branduolinėse elektrinėse (Olkiluoto ir Loviisa). Nuo 1994 m. šalies Branduolinės energijos įstatyme nustatyta, kad „Suomijoje branduolinės energijos naudojimo metu arba dėl jos naudojimo susidariusios branduolinės atliekos turi būti tvarkomos, saugomos ir galutinai šalinamos Suomijoje“. Suomijos vyriausybė 2000 m. priėmė sprendimą, pagal kurį GA buvo įvardintas kaip realiausia galimybė izoliuoti aukšto radioaktyvumo atliekas nuo biosferos ir žmogaus gyvenamosios aplinkos (OECD-NEA, 2001). Šis sprendimas buvo ratifikuotas Suomijos Parlamento 2001 m. 1995 m., vadovaujantis Branduolinės energijos įstatymu, du branduolinės elektros gamintojai „Teollisuuden Voima Oyj“ (toliau - TVO) ir „Fortum Power and Heat Oy“ (Fortum) įkūrė bendrą įmonę „Posiva“. “Posivos” misija yra kurti atliekų šalinimo sprendimus savo savininkų pagamintam panaudotam branduoliniam kurui (kiti RA tipai yra kiekvieno operatoriaus tvarkomi tiesiogiai vietoje). „Posiva“ yra įmonė, atsakinga už Suomijos GA programos įgyvendinimą. „Posiva“ yra įsikūrusi Eurajoki ir turi apie 90 darbuotojų. “Posivos” PBK tvarkymo programa apima RA pakavimo gamyklą, kurioje PBK prieš dėjimą į atliekyną yra įdedamas į specialų kanistrą, ir GA Onkalo vietovėje. Abu įrenginiai yra Olkiluoto saloje, esančioje apie 250 km nuo Helsinkio, pietvakarių Suomijoje, Botnijos įlankoje. Olkiluoto saloje taip pat yra TVO eksploatuojama atominė elektrinė su trimis elektros energiją

gaminančiais reaktoriais ir keletu RA tvarkymo įrenginių. RA pakavimo gamykloje PBK rinklės dedamos į ketaus vidinius kanistrus, kurie užpildomi argonu ir uždaromi geležiniu dangčiu. Vidiniai kanistrai yra padengti 5 cm storio vario apvalkalu, kuris užtikrina ilgalaikę apsaugą nuo korozijos. Olkiluoto laikinojoje saugykloje laikomas PBK bus pervežtas (apie 2 km) į RA pakavimo gamyklą standartiniame konteineryje ant priekabos. Loviisa laikinojoje saugykloje laikomas PBK bus pervežamas keliais arba jūra (apie 300 km). Po to, kai vidinis kanistras bus padengtas išorine varine danga ir galutinai užsandarintas, jis bus perkeliamas į GA tunelį specialiu keltuvu. RA pakavimo gamykla yra virš GA ir tiesiogiai sujungta su jo kanistrų šachta.

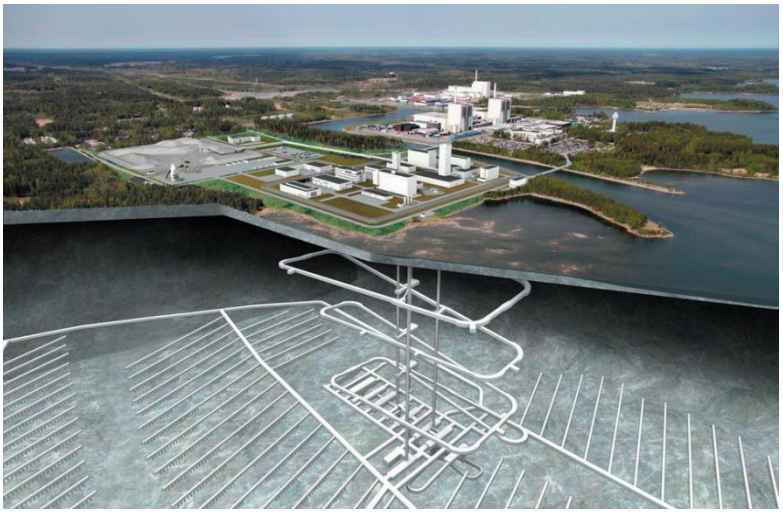
Onkalo vietovė buvo parinkta 1999 m. užbaigus GA vietos parinkimo procesą. Statybos leidimas rampos, keturių (viena skirta personalui, viena – kanistrams, dvi – ventiliacijai) vertikalių šachtų ir horizontalių galerijų įrengimui buvo išduotas 2015 m. GA yra įrengtas maždaug 400 m gylyje kristalinio pamato uolienose (daugiausiai granitas), kurios yra vienos seniausių pasaulyje (GTK, 2021). Visos šachtos ir ertmės kanistrams buvo įrengtos naudojant gręžimo techniką, o galerijos buvo įrengtos naudojant gręžimo ir sprogdinimo techniką. Suomijos GA koncepcija yra pagrįsta KBS-3V technologija, sukurta kartu su Švedijos bendrove “Svensk Kärnbränslehantering AB” (SKB). Vienas saugojimo konteineris (1,05 m skersmens) autonomine transporto priemone yra dedamas į vertikalią ertmę galerijoje (apie 8 m gylio ir 1,75 m skersmens). Konteinerio pervežimo ir įrengimo transporto priemonė konteinerius perveža galerijomis (apie 4 m aukščio ir apie 3,5 m pločio) ir juos įdeda į vertikalias ertmes, kuriose iš anksto yra patalpinti buferinės medžiagos (daugiausiai bentonitas) blokai. Aplink kanistrus išdėstomi buferinės medžiagos blokai, o likę tarpai tarp konteinerio ir vertikalios ertmės sienelių užpildomi smulkiagrūdžiu bentonitu, kad užpildas būtų sandarus. RA šalinimo tunelis užpildomas granulių mišiniu, kuriame taip pat yra bentonito. Onkalo GA jau yra įrengtas, jo projektinė talpa yra apie 6500 tonų PBK, supakuoto į 3250 kanistrų (M. Pohjonen, S. Mustonen, 2023). Eksploatacijos metu GA bus plečiamas kasant daugiau galerijų ir šalinimo tunelių. GA eksploatavimo laikotarpis tęsis iki maždaug 2120 m (Leverd, 2024).

Švedija

Švedija eksploatuoja 6 elektros gamybos branduolinius reaktorius trijose skirtingose vietose (Forsmark, Oskarshamn ir Ringhals). Švedija neturi urano kasyklų, bet turi gamyklas, skirtas gaminti branduolinį kurą iš užsienio šalyse sodrinto urano. (WNA, 2024). Apie 1980 metus Švedijos vyriausybė buvo nusprendusi palaipsniui atsisakyti branduolinės energijos, tačiau 2010

m. šis sprendimas buvo panaikintas šalies parlamento, kuris 2023 m. birželio mėn. pakeitė sprendimą iki 2040 metų šalies elektros energiją gaminti tik iš atsinaujinančių išteklių ir nutarė, kad elektros energija Švedijoje iki minėtų 2040 metų bus gaminama be iškastinio kuro. Taip buvo sudarytos sąlygos toliau naudoti branduolinę energiją. 2023 m. lapkričio mėn. Švedijos vyriausybė paskelbė planą iki 2035 m. pastatyti du naujus reaktorius ir tiria galimybę iki 2045 m. įdiegti papildomus pajėgumus. Švedija turi seniai įtvirtintą RA tvarkymo teisinį pagrindą. „Atliekų įstatyme“ jau 1977 m. buvo reikalaujama, kad branduolinės energetikos operatoriai parengtų išsamią RA tvarkymo koncepciją. Tuo pat metu, remdamiesi šiuo įstatymu, Švedijos branduolinės elektros energijos gamintojai įkūrė bendrą įmonę SKB. Šiuo metu SKB priklauso „Vattenfall“, „Forsmarks Kraftgrupp AB“, „OKG Aktiebolag“ ir „Sydkraft Nuclear Power AB“. SKB misija yra kurti visų savo savininkų pagamintų RA tvarkymo sprendimus. SKB dirba apie 550 darbuotojų jos biurai yra trijose vietose: Solna, Stokholmo šiauriniame priemiestyje, kur yra įsikūrusi pagrindinė būstinė; Forsmark, Östhammar savivaldybėje, apie 120 km į šiaurę nuo Stokholmo, Botnijos įlankos pakrantėje, kur SKB eksploatuoja SFR – mažo ir vidutinio radioaktyvumo atliekų šalinimo įrenginį, ir Oskarshamn, pietryčių Švedijoje, apie 250 km į pietus nuo Stokholmo, Baltijos jūros pakrantėje, kur SKB eksploatuoja laikinąją PBK saugyklą, vadinamą CLAB ir jo požeminę GA laboratoriją. SKB yra operatorius, atsakingas už Švedijos GA programos įgyvendinimą, ir jau turintis patirties tvarkant PBK, nes eksploatuoja požeminę laikinąją saugyklą CLAB ir laivą, skirtą PBK transportavimui iš elektrinių į CLAB. Švedijos aukšto aktyvumo RA tvarkymo programa apima RA pakavimo gamyklos ir GA, skirto PBK statybą. RA pakavimo gamykla bus įkurta Oskarshamne, tiesiai virš esamos PBK laikinosios saugyklos CLAB ir su ja sujungta. GA bus pastatytas Söderviken vietovėje, šalia esamos Forsmark atominės elektrinės. Konteineriai su PBK bus gabenamos į GA laivais.

Švedijos GA koncepcija yra panaši į Suomijos, nes ją kartu parengė abi šalys (KBS 3 sistema). RA pakavimo gamykloje ir GA vykdomos operacijos yra panašaus pobūdžio. Planuojamą GA sudarys spiralės formos prieigos rampos, trys vertikalios šachtos ir horizontalios galerijos, vedančios į vertikalias kanistrų ertmes. GA bus įrengtas maždaug 500 m gylyje (4 pav.). Atliekų konteineris bus transportuojamas į požeminį atliekų šalinimo lygį specialiu sunkvežimiu, važiuojančiu rampa. Švedijos GA kaip ir Suomijos bus pastatytas kristalinio pamato uolienose (daugiausiai granitas).



4 pav. Švedijos planuojamo GA schema (šaltinis - SKB interneto svetainė *https://skb.com*).

Švedijos nacionalinė GA vietos parinkimo programa buvo pradėta 1995 m. Söderviken vieta buvo parinkta SKB 2009 m. SKB pateikė paraišką RA pakavimo gamyklos ir GA statybos leidimui 2011 m. Įmonė šį leidimą gavo 2022 m. (Thegerstrom, 2021), o aplinkosaugos leidimą statyti ir eksploatuoti PBK galutinio saugojimo įrenginį Forsmarke ir RA pakavimo gamyklą Oskarshamne - 2024 m. Švedijos GA projektinė talpa apie 12 000 tonų PBK (6000 kanistrų). Apie 2035 m. numatoma Švedijos GA eksploatacijos, kuri planuojama vykdyti 50 metų, pradžia (Leverd, 2024).

Kanada

Kanadoje branduolinė energetika vystoma apie 60 metų. Kanados plano saugiai tvarkyti PBK ilgalaikėje perspektyvoje vietos parinkimo procesas prasidėjo 2010 m. Jį iniciavo Branduolinių atliekų tvarkymo organizacija (toliau -NWMO). Iki 2012 m. 22 bendruomenės aktyviai pareiškė susidomėjimą projektu ir norą išsiaiškinti savo galimybes jį įgyvendinti. Vietos atrankos procesas vyko per dvejus metus trukusį dialogą. Jis atspindėjo įvairių Kanados gyventojų, kurie dalijosi savo mintimis apie tai, kas turėtų būti įtraukta į atvirą, skaidrų, sąžiningą ir įtraukų sprendimų priėmimo procesą, idėjas, patirtį ir geriausius patarimus. Jis buvo grindžiamas pagrindiniais saugos principais ir sukurtas pagal NWMO etikos ir socialinius principus. Vietos atrankos procesas buvo sukurtas siekiant užtikrinti, kad:

- pasirinkta vieta būtų saugi ir patikima;

- ją priimtų informuoti ir palankūs šeimininkai;
- ji atitiktų aukščiausius mokslinius, profesinius ir etinius standartus.

Kartu su bendruomenėmis NWMO įvertino potencialių vietų tinkamumą pagal griežtus projekto saugos reikalavimus, galimybę parengti saugų ir socialiai priimtiną projektą PBK transportavimui į vietą ir potencialą kurti palaikančius ir atsparius partnerystės ryšius.

Ignace miestelio ir Vabigūno ežero odžibvėjų tautos savivaldybės 2024 m. patvirtino, kad yra pasirengusios priimti projektą. Kiekviena bendruomenė parengė dokumentus, kuriais apibrėžė savo pasirengimą ir nusprendė, kaip jį išreikšti. Minėtos bendruomenės bus tos, kurių teritorijoje bus įrengtas Kanados GA, skirtas PBK. GA, kurį sudarys požeminių tunelių tinklas ir PBK saugojimui skirtos patalpos, planuojama įrengti 650–800 metrų gylyje kristalinio pamato uolienose.

Pagal Kanados koncepciją GA įrenginiui bus reikalinga 3 km ilgio ir 2 km pločio požeminė erdvė. Paviršiuje bus įrengtos patalpos, kuriose prieš dedant į GA PBK bus priimamas, tikrinamas ir perpakuojamas į specialiai tam skirtus konteinerius, įdėtus į bentonitinio molio buferinę medžiagą. Taip pat bus įrengtos patalpos administracijai, apsaugos personalui ir priemonėms, sandarinimo medžiagų apdorojimui, kokybės kontrolei ir nuolatiniam objekto eksploatavimui bei stebėjimui. GA aplinkoje bus įrengta centralizuota paslaugų zona, kurioje bus galima vykdyti požeminę ventiliaciją per tris šachtas, esančias vienoje saugioje zonoje. Plane taip pat numatyti keli prieigos tuneliai, kurie leis techniniams specialistams įrengti kanistrų patalpas tose vietose, kur yra tinkamiausia uoliena. Kanistrų ertmės su buferine medžiaga bus horizontalios, o likusi erdvė bus užpildyta bentonitinio molio granulėmis arba skalda. Faktinis požeminis plotas bet kurioje konkrečioje vietoje priklausys nuo daugelio veiksnių, įskaitant uolienos sandarą, savybes, uolienos blokų geometriją, galutinį saugyklos projektą ir bendrą tvarkytino panaudoto kuro kiekį.

Vietovėje uolienos yra kristalinės. Norint pastatyti GA, uolienos bus kasamos daugiausiai naudojant gręžimo ir kontroliuojamo sprogdinimo metodą. Priklausomai nuo galutinio GA projekto ir vietovės sąlygų, taip pat gali būti naudojama tik gręžimo technologija.

Siekiant pasirengti reguliavimo sprendimų priėmimo procesui ir statybai, NWMO pradėjo dirbti prie saugyklos išdėstymo koncepcinių projektų, remdamasi geomokslinių tyrimų duomenimis ir pirminiais gręžinių

gręžimo vietoje rezultatais. Tai yra kartotinis, nuolat atnaujinamas procesas, kuris apims papildomus įvairių vietos savybių nustatymo tyrimus.

Kanados planas dėl saugaus ilgalaikio PBK tvarkymo dabar yra įgyvendinamas (NWMO interneto svetainė, 2025).

Japonija

Japonijos branduolinės energijos gamybos programoje saugus RA, ypač įstiklintų aukšto radioaktyvumo atliekų, susidarančių perdirbant kurą, tvarkymas yra svarbus klausimas ir mokslinių tyrimų objektas nuo 70-ųjų pabaigos. Antroji pažangos ataskaita apie mokslinius tyrimus, susijusius su aukšto aktyvumo RA geologiniu laidojimu (H12 ataskaita), buvo paskelbta po dviejų dešimtmečių mokslinių tyrimų veiklos ir parodė, kad aukšto aktyvumo RA laidojimas Japonijoje yra įmanomas ir gali būti praktiškai įgyvendintas vietose, kurios atitinka tam tikrus stabilumo reikalavimus. Ataskaitos duomenimis buvo paremti vyriausybės sprendimai, kurie tapo pagrindu 2000 m. įsigaliojusiam „Įstatymui dėl tam tikrų radioaktyviųjų atliekų galutinio šalinimo“. Šis Japonijos įstatymas numato, kad aukšto aktyvumo RA bus dedamos į GA daugiau nei 300 metrų gylyje, prieš tai atlikus trijų etapų vietos parinkimą.

Japonijos branduolinių atliekų tvarkymo organizacija (toliau - NUMO) buvo įsteigta siekiant skatinti ir įgyvendinti branduolinės energijos gamybos metu susidarančių aukšto aktyvumo RA tvarkymą ir šalinimą. NUMO yra atsakinga už branduolinių elektrinių PBK perdirbimo metu susidarančių įstiklintų aukšto aktyvumo RA, taip pat RA, kuriose yra transuraninių radionuklidų (toliau - TRU atliekos), kurių sudėtyje yra didesnė nei nustatyta ilgai išliekančių radionuklidų koncentracija, susidarančių eksploatuojant ir išmontuojant perdirbimo gamyklas bei mišrių oksidų (toliau - MOX) kuro gamyklas, geologinį šalinimą.

Nors radioaktyvumas su laiku savaime mažėja, aukšto aktyvumo RA ir TRU atliekos išlieka radioaktyvios labai ilgą laiką, todėl būtina jas izoliuoti nuo žmogaus aplinkos visą šį laiką. Tarptautinės organizacijos ir šalys visame pasaulyje tyrė įvairius atliekų tvarkymo metodus, ir nustatė, kad dėjimas į GA (geologinis šalinimas) stabilioje uolienoje giliai po žeme yra saugiausias ir patikimiausias metodas.

Vietos GA parinkimui 2002 m. NUMO paskelbė atvirą kvietimą savivaldybėms visoje šalyje, ieškodama vietovių, kuriose būtų galima atlikti apžvalginius tyrimus, kaip pirmąjį GA vietos pasirinkimo etapą, tačiau iki šiol tyrimai nėra atlikti. Atsižvelgdama į šią situaciją, Japonijos vyriausybė

nusprendė visoje šalyje atlikti GA vietos parinkimo mokslinius tyrimus, siekdama nustatyti savivaldybes, kurios galėtų būti tinkamos apžvalginiams tyrimams, jei jos sutiktų.

Japonijos Galutinio atliekų šalinimo įstatyme nurodyta vietos atrankos procedūra susideda iš trijų etapų: apžvalginių tyrimų, preliminarių tyrimų ir išsamių tyrimų. NUMO parengs ataskaitas apie kiekvieno etapo tyrimų rezultatus ir organizuos renginius, skirtus tyrimų rezultatų paaiškinimui. Šiuose renginiuose išreikštos vietos gyventojų nuomonės bus perduotos atitinkamoms prefektūroms ir savivaldybėms kartu su NUMO nuomone, o atranka bus vykdoma atsižvelgiant į vietos gyventojų nuomonę, gavus suinteresuotųjų šalių sutikimą ir užsitikrinus vyriausybės pritarimą. Vyriausybė nustatė, kad tvirtinant kiekvieną vietos parinkimo proceso etapą, turi būti išklausytos atitinkamų savivaldybių merų ir prefektūrų gubernatorių nuomones ir į jas atsižvelgta. Vietų parinkimas, kuris prieštarauja šioms nuomonėms, nebus vykdomas.

Pasirinkus GA statybos vietą, bus suprojektuoti reikalingi įrenginiai ir atliktas saugos vertinimas; statybos darbai bus pradėti tik po vyriausybės ekspertų atlikto saugos vertinimo.

Japonijoje nuspręsta, kad RA bus šalinamos stabilioje uolienoje, esančioje daugiau nei 300 metrų po žeme. Daugiasluoksnė sistema, sudaryta iš dirbtinių ir natūralių (geologinių) barjerų, izoliuos ir sulaikys radioaktyviąsias atliekas ilgą laiką.

Požeminis įrenginys bus sudarytas iš tunelių, skirtų atliekų pakuočių transportavimui ir laikymui. Jis bus įrengtas stabilioje uolienų formacijoje, esančioje daugiau nei 300 metrų gylyje po žeme. Atliekų saugyklos vietos parinkimas bus atliekamas pagal Galutinio atliekų šalinimo įstatymą trimis etapais, kurie apima preliminarių tyrimų vietų (PIA) parinkimą, išsamių tyrimų vietų (DIA) parinkimą ir GA statybos vietos parinkimą. Ant žemės paviršiaus bus įrengtos patalpos, reikalingos požeminių kasimo darbų, eksploatacijos ir saugyklos uždarymo darbams atlikti. Atliekų šalinimo tunelių statyba, ertmių RA pakuotėms įrengimas ir atliekų šalinimo tunelių užpildymas bus atliekami po žeme. Požeminė erdvė, skirta aukšto aktyvumo RA saugyklai, yra didelė, todėl įvairios operacijos bus atliekamos lygiagrečiai atskirose zonose (atliekų šalinimo skyriuose). Paviršiniuose įrenginiuose perdirbtos (įstiklintos) aukšto aktyvumo RA bus įdėtos į papildomus konteinerius, o TRU atliekos bus supakuotos; taip pat bus atliekami reikalingi konteinerių patikrinimai. Šios užduotys bus atliekamos nuotoliniu būdu srityje, kurioje yra įrengta radiacinė apsauga. Įrenginiai bus suprojektuoti taip,

kad atlaikytų tokius įvykius kaip žemės drebėjimai ar gaisrai ir avarijos, kurių metu atliekų konteineriai gali nukristi ar apvirsti (NUMO, interneto svetainė, 2025).

Prancūzija

Prancūzijoje branduolinė energija sudaro apie 75 % visos šalies elektros energijos. Prancūzija eksploatuoja 56 elektros energiją gaminančius branduolinius reaktorius aštuoniolikoje skirtingų vietų (Belleville, Bugey, Cattenom, Chinon, Chooz, Civeaux, Cruas, Dampierre, Flamanville, Golfech, Gravelines, Le Blayais, Nogent-sur-Seine, Paluel, Penly, Saint-Alban, Saint-Laurent des Eaux, Tricastin). Prancūzijos penkiasdešimt septintas reaktorius (EPR tipo reaktorius) Flamanville pradėjo veikti 2024 m. gruodžio 21 d. Prancūzijoje taip pat veikia urano sodrinimo ir branduolinio kuro gamybos įrenginiai. Šalis perdirba panaudotą branduolinį kurą Orano La Hague gamykloje ir gamina MOX kurą iš plutonio. Prancūzija turi keletą didelių civilinių branduolinių mokslinių tyrimų ir plėtros centrų, pavyzdžiui, Cadarache, kur vystomas tarptautinis branduolinės sintezės projektas ITER. Be aštuoniolikos elektros energijos gamybos objektų, kuriuos eksploatuoja nacionalinis elektros energijos gamintojas EDF, dar dvidešimt trys kiti dideli branduoliniai centrai vykdo Prancūzijos civilinę ir karinę branduolinę veiklą. Branduolinės elektros energijos gamyba yra esminė Prancūzijos energetikos politikos dalis. Vyriausybės 2023 m. paskelbtame plane numatyta pastatyti 6 naujus reaktorius ir atlikti tyrimus dar 8 kitų reaktorių statybai. Prancūzijos vyriausybė 2024 m. patvirtino, kad panaudoto branduolinio kuro perdirbimas bus toliau plėtojamas, ir paskelbė ambicingą La Hague perdirbimo gamyklos investicijų programą.

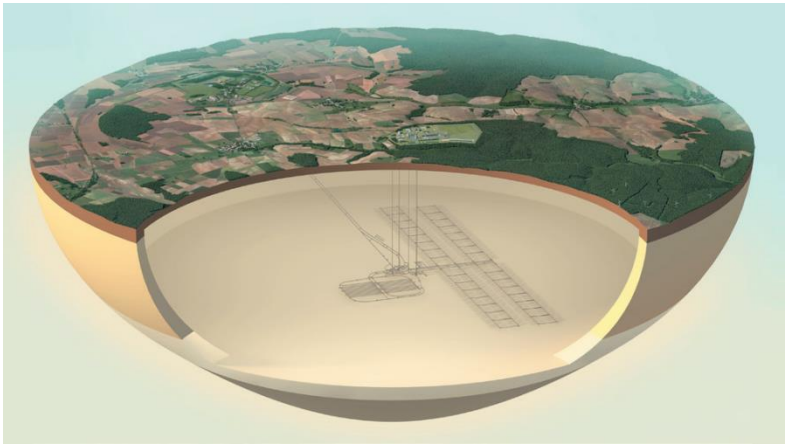
EDF atlieka tyrimus, siekdamas palaipsniui pratęsti eksploatuojamų reaktorių veikimo trukmę, palaipsniui įvedami pratęsimai nuo 40 iki 50 metų. Atliekami tyrimai, siekiant įvertinti galimybę pasiekti 60 metų ir daugiau. Prancūzijos teisinis pagrindas, reglamentuojantis aukšto aktyvumo RA ir vidutinio aktyvumo ilgaamžių RA tvarkymą, buvo patvirtintas parlamento 1991 m. Vėliau buvo priimti nauji įstatymai 2006 m. ir 2016 m., kuriuose buvo apibrėžtos licencijavimo ir būsimo GA eksploatavimo pradžios sąlygos, laikomos pavyzdžiu ilgalaikiam Prancūzijos aukšto aktyvumo RA tvarkymui. Prancūzijos teisės aktai numato, kad aukšto ir vidutinio aktyvumo ilgaamžės RA turi būti dedamos į GA taip, kad būtų galimybė jas išimti mažiausiai 100 metų. Andra, nacionalinė Prancūzijos radioaktyviųjų atliekų tvarkymo agentūra, buvo įsteigta įstatymu 1991 m. Andra yra viešoji įstaiga, visiškai nepriklausoma nuo radioaktyviųjų atliekų gamintojų. Andra užduotys yra apibrėžtos įstatymu. Jos apima visų Prancūzijos RA tvarkymo įrenginių

kūrimą, projektavimą, statybą ir eksploatavimą. Andra yra įsikūrusi Châtenay-Malabry, pietiniame Paryžiaus priemiestyje, ir turi apie 750 darbuotojų.

Andra eksploatuoja labai mažo radioaktyvumo atliekų sąvartyną (CIRES) ir paviršinio laidojimo įrenginį, skirtą mažo ir vidutinio aktyvumo trumpaamžėms RA (CSA). Abu įrenginiai yra Aube departamente, apie 175 km į rytus nuo Paryžiaus. Andra taip pat yra atsakinga už La Hague gamyklos kaimynystėje esančio paviršinio laidojimo įrenginio (CSM) eksploatavimą ir stebėseną. Šiuo metu (2024 m.) CSM nebepriima RA ir palaipsniui pereina į priežiūros etapą. Prancūzijos GA projektas vadinasi „Cigéo“. Jis vystomas Bure ir Saudron, dviejose mažose savivaldybėse, esančiose apie 200 km į rytus nuo Paryžiaus. Vietovės aplinka yra kaimiška, joje nėra anksčiau buvusių branduolinių ar didelių pramoninių objektų. Cigéo yra skirtas, aukšto ir vidutinio aktyvumo ilgaamžėms RA tvarkyti. Prancūzijos aukšto aktvumo RA yra įstiklintos, nes šalyje PBK yra perdirbamas. Dėl didelės branduolinės pramonės Prancūzijos vidutinio aktyvumo ilgaamžės RA yra labai įvairios formos ir tipo (cementuotos, suspaustos, bitumuotos ir kt.).

Visos aukšto ir vidutinio aktyvumo RA prieš išsiunčiant į Cigéo bus supakuojamos į kietųjų atliekų pakuotes jų pirminėse gamybos vietose. Atliekų pakuotės į Cigéo bus gabenamos traukiniu. Prancūzijos RA tvarkymo centrą Cigéo sudaro paviršiniai statiniai ir požeminė infrastruktūra (5 pav.). Paviršiniai statiniai yra sugrupuoti į dvi pagrindines zonas. Šių zonų įrenginių pagrindinės funkcijos yra kontroliuoti atliekų pakuotes, jas paruošti dėjimui į GA ir vystyti RA tvarkymo veiklas ir statybos darbus, skirtus Cigéo plėtrai.

Pagal Cigeo projektą įstiklinti aukšto aktyvumo RA paketai bus įdedami į suvirintą anglies plieno išorinį konteinerį. Vidutinio aktyvumo ilgaamžės RA bus dedamos į betoninę atliekų šalinimo išorinę talpą arba į plieninį RA tvarkymo krepšį. Šias galutinio įpakavimo operacijas atliks Andra Cigéo paviršiniuose įrenginiuose. Cigéo GA paviršinei infrastruktūrai yra priskiriama privati geležinkelio linija, jungianti Cigéo GA su viešuoju geležinkelio tinklu, ir privatus keliąs, jungiantis dvi pagrindines paviršines GA zonas.



5 pav. Prancūzijos Cigeo projekto planuojamo GA schema (šaltinis - ANDRA interneto svetainė *https://www.andra.fr/*).

Cigéo GA požeminę dalį sudaro iš 2 linijinės prieigos rampos, 5 vertikalios šachtos ir horizontalios galerijos, vedančios į horizontalius atliekų šalinimo tunelius (Andra, 2024). Nuo paviršiaus atliekų konteineriai bus transportuojami į šalinimo lygį funikulieriumi, veikiančiu vienoje iš dviejų rampų. Aukšto aktyvumo RA konteineriai įdedami į plienu dengtus horizontalius mikro tunelius (nuo 80 iki 150 m ilgio, apie 0,8 m skersmens), o mažo aktyvumo ir labai mažo aktyvumo atliekų pakuotės bus dedamos į betoninius tunelius (iki 500 m ilgio, apie 10 m skersmens). Skirtingo radioaktyvumo atliekos bus dedamos į atskiras GA zonas. Cigeo GA yra įrengiamas maždaug 500 m gylyje juros sistemos Kelovėjo ir Oksfordžio aukštų molingų uolienų sluoksnyje (*angl COx*) toliau - COx)). Molingų uolienų sluoksnio storis GA vietoje yra ne mažesnis kaip 120 m. Palankiausios GA įrengimui šių uolienų savybės yra susijusios su radionuklidų sulaikymu sorbcijos ir labai lėtos difuzijos procesų dėka. Cigéo yra suprojektuotas 10 000 m^3 aukšto aktyvumo RA ir 73 000 m^3 vidutinio ir mažo aktyvumo RA sutvarkymui. Šiuo metu (2024 m.) Andra yra pateikusi paraišką Prancūzijos GA statybos leidimui gauti, o būsimo GA vietoje veikia požeminė laboratorija, kurioje atliekami įvairūs tiek Prancūzijos GA projekto, tiek tarptautiniai tyrimai. Eksploatuojant GA, požeminė infrastruktūra bus plečiama kasant daugiau galerijų ir tunelių. GA eksploatavimą numatoma vykdyti nuo 2040 m. iki maždaug 2150 m.

Šveicarija

Šveicarija eksploatuoja keturis reaktorius trijose branduolinėse elektrinėse (Gösgen, Leibstadt ir Beznau). Šveicarijoje nėra urano kasyklų ar

kitos branduolinės pramonės (CERN ir PSI yra mokslinių tyrimų įstaigos). Visas branduolinis kuras yra importuojamas (WNA, 2024). Šveicarija palaipsniui atsisako branduolinės energijos. 2011 m. vyriausybė ir parlamentas nusprendė, kad Šveicarijos branduoliniai reaktoriai nebus keičiami. Šis sprendimas buvo patvirtintas 2017 m. referendumu. Esami reaktoriai gali likti eksploatuojami tol, kol Šveicarijos branduolinės saugos institucija juos laikys saugiais. Šveicarijos branduolinės energetikos įstatyme nustatyta, kad kiekvienas asmuo, eksploatuojantis branduolinį objektą, privalo saugiai tvarkyti visas tame objekte susidarančias radioaktyviąsias atliekas. 1972 m. visi Šveicarijos radioaktyviųjų atliekų gamintojai, daugiausiai atominės elektrinės, įkūrė Nagra (*vok. „Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle“)*. Keletą procentų Nagra biudžeto finansuoja Šveicarijos federalinė vyriausybė, atsakinga už mokslinius, techninius ir medicininius radioaktyviųjų atliekų tyrimus. Kaip kooperatyvinė bendrovė, Nagra yra atsakinga už visų Šveicarijos radioaktyviųjų atliekų tvarkymo sprendinių kūrimą ir įgyvendinimą. Nagra yra įsikūrusi Vetingene (Aargau kantonas) netoli Ciuricho ir turi apie 130 darbuotojų. Nagra dar neeksploatuoja branduolinės energetikos objektų (Leverd, 2024).

Šveicarijoje buvo vykdomos dvi RA tvarkymo programos. Viena jų skirta žemo ir vidutinio aktyvumo atliekų tvarkymui, o kita – aukšto aktyvumo atliekų ir panaudoto branduolinio kuro tvarkymui. Vykdant aukšto aktyvumo ir ilgaamžių vidutinio aktyvumo RA tvarkymo programą atliekami GA įrengimo dviejose potencialiose geologinėse formacijose galimybių tyrimai. Viena iš tiriamų formacijų yra šiaurinės Šveicarijos kristalinio pamato uolienos, kurių tinkamumas GA buvo tiriamas iki 1985, tačiau geologiniu požiūriu šią formaciją detaliau tirti yra sudėtinga. Gręžimo darbai yra sustabdyti, nes seisminių tyrimų rezultatai neleidžia spręsti apie tinkamo uolienų bloko paplitimą. Kristalinės uolienos laikomos alternatyvia geologine formacija. Nuo 1988 m. vyriausybės nurodymu buvo pradėti nuosėdinių uolienų tinkamumo GA tyrimai. Pradžioje buvo parinktos dvi formacijos: 1) Molasos ir 2) Opalinus (toliau - OPA) molio skalūno. Pirmosios buvo atsisakyta dėl mažesnio homogeniškumo ir aukštesnių filtracinių savybių parametrų rodiklių. Nuosėdinių uolienų tyrimai šiaurinėje Ciuricho kantono dalyje pradėti 1994 m. (NEA, 2020).

Sprendimas dėl Šveicarijos GA vietos parinkimo yra priimtas 2022 m. Šveicarijos GA projektas yra skirtas visų Šveicarijos RA, įskaitant mažo ir vidutinio aktyvumo RA, sutvarkymui. Šveicarijos aukšto aktyvumo RA yra tiek PBK, tiek įstiklintos atliekos, nes Šveicarija dalį PBK perdirbo užsienyje pagal komercines sutartis. Šveicarijos aukšto aktyvumo RA tvarkymo

programa apima RA pakavimo gamyklą ir GA. Nagra šiuo metu atlieka šių dviejų įrenginių koncepcinius projektavimo tyrimus. RA pakavimo gamykloje atliekos bus tikrinamos, pakuojamos ir ruošiamos transportavimui į GA. Nagra dar nepriėmė sprendimo dėl GA skirtų konteinerių projekto. Šveicarijos RA pakavimo gamykla bus pastatyta Würenlingene, apie 30 km į šiaurės vakarus nuo Ciuricho, Šveicarijos laikinojo saugojimo įrenginio ZWILAG vietoje. Šioje vietoje jau yra kompetencijos centras RA tikrinimui ir pakavimui bei mažo ir vidutinio aktyvumo RA tvarkymo įrenginys. Šveicarijos GA bus įrengtas Nördlich Lägern regione, Stadel bendruomenėje, Haberstal vietovėje, apie 20 km į šiaurę nuo Ciuricho. Šveicarijos GA sudaro paviršiniai statiniai ir požeminė infrastruktūra. Paviršiuje numatomas pagrindinis statinys, kuriame bus įrengtas pagrindinis patekimo į GA įrenginys ir pagalbinis nusileidimas į požeminį RA tvarkymo lygį. Požeminę infrastruktūrą sudaro vertikalios šachtos, skirtos statybai, atliekų pervežimui, asmenų nusileidimui ir ventiliacijai, bei dviejų atskirtų zonų, skirtų aukšto aktyvumo RA ir mažo - vidutinio aktyvumo RA sutvarkymui. Pagal Nagra koncepciją yra numatyta talpas su PBK ir aukšto aktyvumo RA laikyti horizontaliuose požeminiuose tuneliuose, kurie vėliau bus užpildomi bentonitinio molio sluoksniu. Šveicarijos GA bus statomas OPA molingų perkonsoliduotų uolienų sluoksnyje. OPA formacijos uolienos pagal radionuklidų sulaikymą yra panašios į Prancūzijos COx uolienas. Nördlich Lägern vietovėje OPA uolienų storis siekia 110 m, kas buvo svarbu parenkant vietą GA. Planuojamas Šveicarijos GA gylis yra apie 900–1000 m nuo žemės paviršiaus. Šveicarijos GA yra suprojektuotas talpinti apie 82 000 m^3 supakuotų RA, iš jų apie 10 % aukšto aktyvumo ir apie 90 % mažo ir vidutinio aktyvumo (Nagra, 2022 b). Nagra planuoja, kad Šveicarijos GA eksploatacijos etapas truks iki maždaug 2125 m (Leverd, 2024).

JAV

JAV šiuo metu (2023 m.) veikia pirmoji laikinoji RA saugykla (angl. *waste isolation pilot plant WIPP*), įrengta 655 m gylyje permo akmens druskos apie 600 m storio sluoksnyje Karlsbade, Naujosios Meksikos valstijoje. Šios saugyklos vietos paieškos buvo pradėtos dar šeštajame XX a. dešimtmetyje iškilus būtinybei tvarkyti transuranines RA. Tyrimai, skirti atliekyno aikštelės apibūdinimui buvo vykdomi apie 1985 metus. Juos vykdė JAV energetikos departamentas, pasitelkdamas pažangiausius įvairių sričių mokslininkus. Įrengus WIPP kiekvienai vykdomai veiklai, tarp jų moksliniams tyrimams, buvo atliekamas poveikio aplinkai vertinimas, kurio rezultatus vertina ir tvirtina JAV aplinkos apsaugos agentūra (EPA). Tebeveikiant WIPP buvo pradėti tyrimai, skirti aukšto aktyvumo RA saugyklai įrengti Yucca kalne,

Nevados valstijoje, netoli branduolinių bandymų poligono, vulkaninio tufo formacijoje. Tačiau pastaraisiais dešimtmečiais atliktų tyrimų rezultatų ir vis griežtėjančių pasaulinių RA tvarkymą reglamentuojančių standartų pagrindu ši programa kėlė vis daugiau abejonių. Be daugelio kitų buvo atlikti Yucca kalno apylinkių tektoninių ir neotektoninių sąlygų tyrimai, kurių rezultatai parodė nepakankamą ilgalaikį formacijos stabilumą. JAV kongrese 2011 metais buvo patvirtintas federalinis įstatymas nutraukiantis programos Yucca kalne finansavimą, dėl ko programos vykdymas buvo sustabdytas. Pagrindinės sustabdymo priežastys buvo politikų nesutarimas ir didelis visuomenės, ypač Šošonų genties, pasipriešinimas (NEA, 2020).

Kai 2008 m. buvo pateikta licencijos paraiška dėl saugyklos statybos Jukos kalne, tai buvo pirmoji licencijos paraiška pasaulyje dėl panaudoto branduolinio kuro ir aukšto radioaktyvumo atliekų geologinio laidojimo. Dabar praėjo daugiau nei dešimt metų nuo tada, kai buvo sustabdyti darbai dėl GA Yucca kalne. Toliau siūlomos išsamios branduolinių atliekų politikos reformos, pvz., Branduolinių atliekų administravimo įstatymas, tačiau nė viena iš jų dar nebuvo patvirtinta Kongrese. Norint atnaujinti aktyvią programą dėl GA Jungtinėse Valstijose, įstatymų leidėjai turi imtis veiksmų.

GA įrengimas JAV yra įmanomas. Skirtingai nuo kai kurių iš minėtų šalių, Jungtinėse Valstijose aptinkamos įvairios sąlygos, potencialiai tinkamos GA.

Lietuva pasauliniame giluminių atliekynų tyrimų kontekste

Pagal tyrimų apimtį, rezultatus ir GA vietos parinkimo proceso pažangą Lietuva yra didelėje grupėje šalių, kuriose GA vieta dar nėra parinkta, ilgaamžių radioaktyviųjų atliekų ir panaudoto branduolinio kuro tvarkymo programa tik pradedama įgyvendinti, o geologiniai tyrimai yra daugiausiai apžvalginiai ar tik maža dalimi tiesioginiai. Šiai grupei galima būtų priskirti tokias šalis kaip Čekija, Austrija, Slovakija, Vengrija, Rumunija, Kroatija, Bulgarija ir kt. Daugumoje šios grupės šalių yra pasirenkama viena pagrindinė partnerė iš 2 lentelėje įvardintų šalių, kurios patirtis perimama didžiausia apimtimi, derinamos GA koncepcijos, naudojamasi požeminėmis laboratorijomis.

Šiuo metu pasaulyje veikia visa eilė požeminių laboratorijų, kuriose yra vykdomi tiek su konkrečia vieta susiję, tiek tarptautinių projektų tyrimai. Požeminės laboratorijos yra dviejų tipų. Vienos yra skirtos bendriems tyrimams, kurių rezultatai gali būti panaudoti įrengiant GA kitose vietose, o kitos yra įrengtos parinktose GA vietose, jose vykdomi tyrimai yra susiję su

konkrečia geologine formacija ir vieta. Esminis skirtumas tarp bendrųjų ir konkrečioms vietovėms skirtų URL yra susijęs su tuo, ar siekiama gauti duomenis supratimui apie procesus, vykstančius uolienose, ar konkrečioms vietovėms skirtos informacijos rinkimui. (NEA, 2024). Pavyzdžiui, Šveicarijos Mont Teri tunelyje vykdomi OPA molingos formacijos, kuri yra parinkta GA įrengimui, tyrimai, o Grimselio tunelyje yra vykdomi tyrimai kristalinėse uolienose. Belgijos SCK - CEN branduolinių tyrimų centro požeminėje Hades laboratorijoje, esančioje 220 m gylyje prie Mol'o ir Desselio miestelių, tiriama Boom molio formacija, kuri numatoma panaudoti GA įrengimui kitoje vietoje. Prancūzijos Bure požeminėje laboratorijoje atliekami juros sistemos COx molingų uolienų tyrimai konkrečioje GA įrengimui parinktoje vietoje.

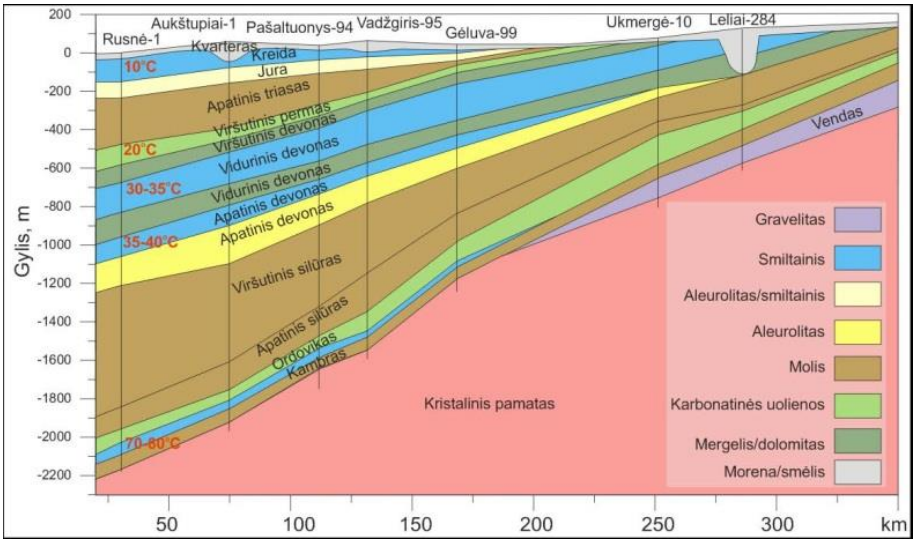
Lietuvoje iki 2025 metų yra parinktos potencialios geologinės formacijos. GA įrengimo galimybes ir ilgalaikę saugą lemiantys šių formacijų parametrai yra nustatyti tik pagal anksčiau atliktų, kitiems tikslams skirtų, tyrimų duomenis arba anksčiau gręžtų gręžinių nekonservuoto kerno laboratorinių tyrimų rezultatus. Lietuvos potencialios geologinės formacijos nėra palygintos su kitomis pasaulyje nagrinėjamomis GA įrengimo aspektu formacijomis.

Tolimesnių geologinių tyrimų GA įrengimui Lietuvoje tikslas yra nustatyti reikšmingiausius potencialių geologinių formacijų parametrus, juos palyginti su požeminėse laboratorijose tiriamų formacijų parametrais ir parinkti požemines laboratorijas, kuriose būtų galima ištirti ir įvertinti Lietuvos potencialias geologines formacijas.

1.7. Potencialios geologinės formacijos giluminio atliekyno įrengimui

Geologinis radionuklidų sklaidos barjeras yra itin svarbus ilgalaikei GA saugai, todėl būtinybė detaliai ištirti geologines sąlygas yra neabejotina. Kaip jau minėta, potencialiai tinkama aplinka GA įrengimui gali būti žemyniniai baseinai, jūros link gelmėjančios ar po jūros dugnu slūgsančios nuosėdinės uolienos ir mažai laidus kristalinis pamatas po nuosėdine danga. Tokios GA įrengimui potencialiai palankios sąlygos yra būdingos Lietuvos žemės gelmėms. Hidrogeologiniu požiūriu Lietuva yra Baltijos arteziniame baseine, nuosėdinės uolienos gelmėja jūros link, o po nuosėdine danga slūgso kristalinis pamatas.

Lietuvos teritorija yra Šiaurės rytinėje Rytų Europos platformos dalyje. Kristalinis pamatas slūgso 200-2300 m gylyje nuo žemės paviršiaus. Jos nuosėdinę dangą sudaro visų geologinių sistemų uolienos (6 pav.). Vendą (pavadinimas buvo pakeistas į Ediakarą) ir kambrą sudaro terigeninės uolienos (argilitas, molis, gravelitas, smiltainis, aleurolitas), ordoviką ir silūrą - karbonatinės ir molingos uolienos (klintis, mergelis, dolomitinis mergelis, dolomitas, argilitas, molis), devoną - karbonatinės, smėlingos ir molingos uolienos (smiltainis, smėlis, molis, dolomitinis mergelis, dolomitas ir kt.), permą - daugiausiai karbonatinės ir evaporitinės uolienos (klintys, anhidritas, vietomis akmens druska), triasą - molingos uolienos (molis su smiltainio ir aleurolito tarpsluoksniais), jurą - molingos ir smėlingos uolienos (molis, aleurolitas, smiltainis), kreidą - karbonatinės, molingos ir smėlingos uolienos (kreida, kreidos mergelis, molis, smiltainis), paleogeną ir neogeną - smėlingos ir molingos uolienos (smėlis, aleuritas, molis), o kvarterą - daugiausia glacigeninės nuogulos (morena, smėlis, žvyras ir kt.).



6 pav. Apžvalginis Lietuvos teritorijos vakarų - rytų krypties geologinis pjūvis, kuriame vertikalios juodos linijos žymi gręžinių vietas, raudoni skaičiai - temperatūrą. (Šliaupa, 2019).

1.8. Lietuvos potencialių geologinių formacijų slūgsojimo sąlygų apžvalga

Kristalinis pamatas (KP) yra perdengtas nuosėdinės dangos uolienų. Geriausiai ištirtos pietinė ir pietvakarinė Lietuvos dalys, kur 1971-1996 metais buvo vykdomi detalūs kristalinio pamato uolienų tyrimai gręžiniais ir geofiziniais metodais. Likusioje Lietuvos teritorijos dalyje gręžinių tinklas ir geofizinis ištirtumas yra žymiai skurdesnis. Iš viso Lietuvos teritorijoje yra išgręžta apie 400 gręžinių, įsigilinusių į kristalinį pamatą. Svarbu, jog gausiausia geologinė informacija yra susijusi su ta Lietuvos dalimi, kur kristalinio pamato uolienos slūgso mažiausiame gylyje. Kristalinio pamato gylis mažiausias (210 metrų) yra prie pietinės Lietuvos sienos. Pamatas gilėja į šiaurės vakarus. Vilniaus rajone jis yra apie 550-600 metrų gylyje, Kauno – beveik 1 kilometro gylyje (Žvykas ir kt., 1985, Žvykas, 1993). IAE regione kristalinio pamato gylis yra apie 700-750 m. Riba tarp 700 metrų ir didesnio kristalinio pamato gylio praeina maždaug pagal Lazdijų-Vilniaus-Ignalinos liniją. Bendrą pamato polinkį į šiaurės vakarus komplikuoja tektoniniai lūžiai. Vyrauja platuminės krypties elementai. Amplitudės siekia iki 50 metrų. Potencialiai tinkama formacija, atsižvelgiant į anksčiau minėtus pagrindinius kriterijus, gali būti laikoma didesnio nei 50 m storio, bent keleto kvadratinių kilometrų ploto mažai plyšiuota kristalinio pamato uolienų dalis.

Apatinio kambro Baltijos serijos molinga formacija (Є$_1$)

Žemėlapiuose ir literatūros šaltiniuose (Paškevičius, 1999) apibendrinta informacija rodo, kad Baltijos serijos uolienos turinčios aiškią molingą litologinę išraišką ir ryškias stratigrafines ribas, paplitusios tiktai rytinėje Lietuvos dalyje - į rytus nuo Kauno meridiano ir toliau tęsiasi į Rytų Latviją, Rytų ir Šiaurės Estiją, vakarinę Rusijos dalį. Storio, paplitimo ir gylio žemėlapiai buvo sudaryti pagal 100 gręžinių duomenis (Kanopienė ir kt., 2004). Apatinio kambro Baltijos serijos storis laipsniškai didėja rytų ir šiaurės kryptimis nuo 0 iki 115,6 m. Atitinkamai pilnėja serijos uolienų pjūvis, prisidedant vis jaunesniems sluoksniams. Pilniausias apatinio kambro Baltijos serijos pjūvis būdingas Ignalinos rajonui, kur jos storis siekia apie 95 m (Čyžienė et al., 2005, Jankauskas, 2002). Sluoksniai gelmėja šiaurės vakarų kryptimi. Potencialiai tinkama formacija gali būti laikoma didesnio nei 50 m storio, bent keleto kvadratinių kilometrų ploto apatinio kambro Baltijos serijos uolienų dalis, kurioje molis sudaro daugiau kaip 50% tūrio.

Apatinio triaso uolienos (T$_1$) paplitusios pietvakarinėje Lietuvos dalyje - į pietus nuo Šalčininkų-Naujosios Akmenės linijos. Triaso molinga storymė pasižymi žymiai didesniu ištirtumu - daugiau nei 2000 gręžinių kerta apatinio triaso uolienas. Gan detalų triaso uolienų geologinį ištirtumą lėmė tai, kad jos dengia intensyviai naudojamą viršutinio permo vandeningąjį sluoksnį (N. Akmenės, Sasnavos ir Kalvarijos svitų uolienas). Sluoksnių slūgsojimo gylis ir storis palaipsniui didėja pietvakarių kryptimi. Apatinio triaso uolienos šiaurinėje ir šiaurės vakarinėje Lietuvos dalyje slūgso po kvartero danga ir palaipsniui grimzta iki 500-550 m Lenkijos pasienyje. Šia kryptimi didėja ir apatinio triaso uolienų storis. Triaso uolienos dažniausiai slūgso ant permo sistemos uolienų. Tačiau yra vietų, kur triaso aslą sudaro senesnio amžiaus uolienos: Vidurio Lietuvoje, ties Raseiniais – devono, o pietų Lietuvoje – kristalinio pamato uolienos. Viršutinė formacijos riba ryški, nes ją dengia juros periodo terigeninė tamsios spalvos storymė, kreidos glaukonitinis smėlis arba kvartero ledyninės uolienos (Katinas, 2015). Potencialiai tinkama formacija gali būti laikoma didesnio nei 50 m storio, bent keleto kvadratinių kilometrų ploto apatinio triaso uolienų (daugiausiai Nemuno ir Palangos svitos) dalis, kurioje molis sudaro daugiau kaip 50% tūrio.

Permo sistemos Priegliaus svitos evaporitų – anhidrito, gipso ir akmens druskos - storymė plačiai paplitusi pietinėje ir pietvakarinėje Lietuvos teritorijos dalyje maždaug 12 tūks. km^2 plote. Priegliaus svitos sulfatinės uolienos slūgso ant permo Naujosios Akmenės svitos karbonatinių uolienų ir gelmėja pietvakarių kryptimi. Priegliaus svitos uolienos slūgso 150-790 m gylyje su ryškai išreikštu uolienų gelmėjimu 1-20° kampu pietvakarių kryptimi. Žemaitijoje ir Rytų Lietuvoje jos aptinkamos 145-300 m gylyje.

Formacijos storis labai kaitus - nuo kelių metrų išsipleišėjimo zonoje iki 146 m (Galzdonų-1 gręž.) ir net 276 m Kaliningrado srities pietvakarinėje dalyje (Vladimirovo-1 gręž.). Esant bendrai storio didėjimo tendencijai nuo periferijos baseino centro link, net nedideliame atstume storis gali skirtis kelis kartus. Linijiniai ištęstos formos anhidrito kūnų susidarymas siejamas su linijinėmis tektoniškai aktyvesnėmis zonomis, o anhidrito platformų formavimasis – su tektoniškai aktyvesniais baseino dugno blokais (Kadūnas, 2001).

Dažnai greta esančiuose gręžiniuose su labai skirtingu anhidrito sluoksnio storiu didesnis storis sutinkamas ant pakopų: Pajūrio-1 gręžinyje Priegliaus svitos pado absoliutinis aukštis yra -338 m, svitos storis 72 m, o greta esančiame Jucaičių-1 gręžinyje atitinkamai -392,7 m ir 7,5 m, Aukštupių-3 gręžinyje padas yra -415,5 m absoliutiniame aukštyje, svitos storis 73 m, o greta esančiame Aukštupių-2 gręžinyje atitinkamai -441,2 m ir 39 m. Permo anhidrito storymė yra tektoniškai sąlyginai stabili, išskyrus padidinto tektoninio aktyvumo vakarų Lietuvos bei Nemuno zonas, kuriose keliolikos kvadratinių kilometrų plote stebimas padidintas anhidrito plyšiuotumas. Plyšiai dažniausiai yra užpildyti epigenetiniu gipsu. Anhidrito ir gipso storymę dengia iki 295-303 m storio siekiantys triaso ir kreidos dariniai bei 50-100 m. storio kvartero nuogulos (Kadūnas, 2003).

1.9. Duomenys Lietuvos potencialių geologinių formacijų vertinimui

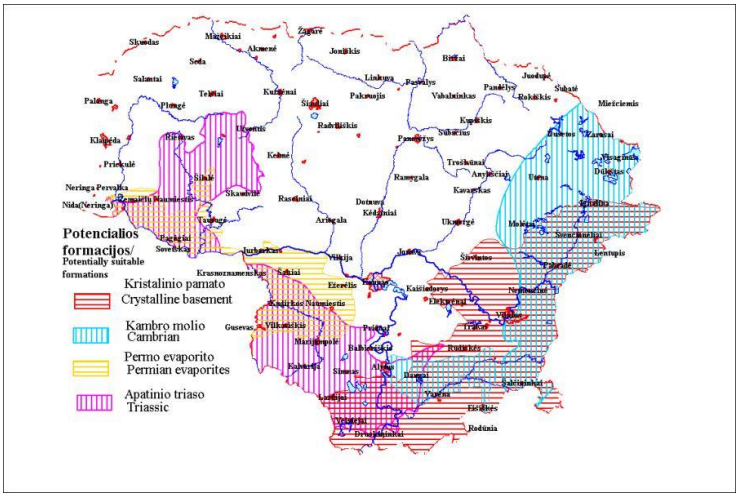
Potencialios geologinės formacijos ir vietos GA parinkimo procesas yra ilgalaikis ir daugelio sričių mokslinių tyrimų reikalaujantis procesas. Šio proceso geologiniai tyrimai galėtų būti apibūdinami ir klasikinių geologinių tyrimų stadijomis. Pirmiausiai būtina atlikti geologinį kartografavimą, kurio metu turi būti nustatytos uolienų slūgsojimo sąlygos, preliminarūs geometriniai parametrai (gylis, storis, slūgsojimo polinkis) ir išaiškintos uolienų susidarymo sąlygos. Antroji stadija galėtų būti vadinama geologinės paieškos stadija, kurios metu turėtų būti atlikta potencialiai tinkamų GA įrengimui geologinių kūnų paieška. Šie kūnai įvardijami potencialiai tinkamomis geologinėmis formacijomis. Galutinė GA vietos parinkimo stadija galėtų būti vadinama geologinės žvalgybos stadija. Jos metu turėtų būti tiesioginiais tyrimų metodais įrodytas potencialiai tinkamų geologinių formacijų slūgsojimas palankiose GA įrengimui sąlygose. Tokiu būdu išskyrus geologinių tyrimų stadijas, galima teigti, kad Lietuvoje vis dar yra vykdomi potencialių geologinių formacijų paieškos tyrimai.

Šiuo metu visoje Lietuvos teritorijoje yra atliktas geologinis 1: 200 000 mastelio kartografavimas, atskiros teritorijos yra kartografuotos stambesniu 1: 50 000 masteliu. Didesniame nei 200 m gylyje slūgsančios uolienos pietinėje

Lietuvos dalyje yra tirtos specialaus giluminio kartografavimo 1: 200 000 masteliu metu.

Lietuvoje yra išgręžta keletas tūkstančių gilesnių nei 200 m gręžinių. Iš jų 2680 yra susisteminti, o jų duomenys patalpinti į Valstybinę geologijos informacinę sistemą. Didžiąją šių gręžinių dalį sudaro gėlo požeminio vandens gavybos iš permo ir devono vandeningųjų sluoksnių gręžiniai. Šie gręžiniai didžiąja dalimi yra toje Lietuvos teritorijos dalyje, kur aktyvios požeminio vandens apykaitos zonos storis viršija 200 ir daugiau metrų. Tokios sąlygos nėra potencialiai tinkamos GA įrengimui. Daugiausiai informacijos apie kelių šimtų metrų gylyje slūgsančias geologines formacijas Lietuvoje suteikia struktūrinių gręžinių gręžimo ir tyrimų juose ataskaitos, prekvartero geologinio kartografavimo ataskaitos, naftos ir kai kurių kietųjų naudingųjų iškasenų paieškos ar žvalgybos dokumentai. Vertinant Lietuvos potencialiai tinkamų GA įrengimui geologinių formacijų ištirtumą buvo analizuojamas tyrimų ataskaitų ir uolienų savybių parametrų tyrimų rezultatų skaičius (Kanopienė ir kt., 2004).

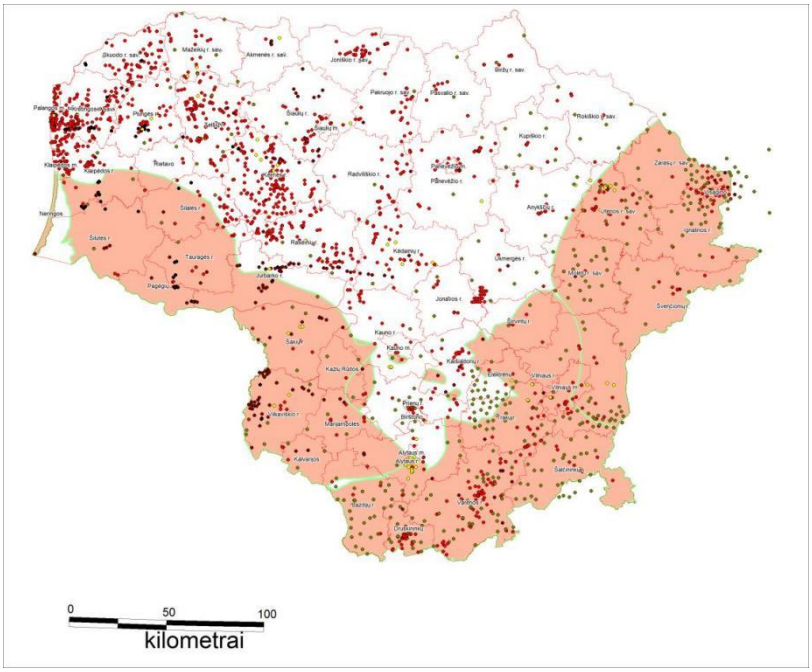
Potencialiai tinkamų GA geologinių formacijų išskyrimas Lietuvoje vyko ilgą laiką. Pirmieji žemėlapiai pagal bendruosius tinkamumo GA įrengimui kriterijus, įvardintus ankstyvuosiuose TATENA dokumentuose (IAEA, 1981 ir kt.) ir literatūroje (Savage et al., 1995), buvo sudaryti 2001 - 2003 metais (Kanopienė ir kt., 2003, Satkūnas ir kt., 2005). Šiuose žemėlapiuose buvo išskirtos potencialiai tinkamos GA įrengimui geologinės formacijos, kurių minimalus storis siekia 50 m, o slūgsojimo gylis viršija 200 m. Formacijų išskyrimas rėmėsi tam tikro amžiaus sluoksnių slūgsojimo sąlygomis, o į uolienų savybių kaitą horizontalia ir vertikalia kryptimis nebuvo atsižvelgta. Apibendrinant sudarytus žemėlapius buvo parengta potencialiai tinkamų GA geologinių formacijų schema (7 pav.).



7. pav. Potencialiai tinkamų GA Lietuvos geologinių formacijų paplitimo schema (Satkūnas ir kt., 2005).

Vėlesniais metais potencialių geologinių formacijų išskyrimas buvo tikslinamas atsižvelgiant į vis didesnį detaliai išanalizuotų duomenų kiekį (Čyžienė ir kt., 2022, Čyžienė ir kt., 2023).

Analizuojant duomenis apie potencialias Lietuvos geologines formacijas, visų šių formacijų paplitimo plotai buvo apjungti (8 pav.). Šiame apjungtame plote yra susisteminti duomenys apie 834 gilesnius nei 200 m įvairios paskirties gręžinius (3 lentelė). Vienas svarbiausių duomenų šaltinių geologinių formacijų tinkamumo GA vertinimui yra gręžinių kernas. Iš 834 minėtų potencialių geologinių formacijų plote išgręžtų gręžinių tik 370 yra išsaugotas kernas. Dėl įvairių priežasčių gręžinių kernas nebuvo iškeliamas 100%, todėl nepilnai apibūdina geologinį pjūvį, o potencialiai tinkamos GA uolienos dažniausiai buvo pragręžiamos nepakeliant kerno.



8 pav. Potencialiai tinkamų GA geologinių formacijų paplitimo ploto (rusva spalva) ir gręžinių (žymimi skrituliais: raudoni - požeminio vandens gavybos; rudi - struktūriniai; žali - kartografavimo gilieji; juodi - naftos tyrimų ir gavybos; geltoni - žvalgybos) išsidėstymo schema (sudarė autorė pagal Valstybinės geologijos informacinės sistemos duomenis ir (Čyžienė ir kt., 2023)).

3 lentelė. Analizuotų gręžinių duomenys.

Paskirtis	Skaičius	Maksimalus gylis, m	Išteklių rūšis
Gavybos	190	682.80	Gėlas ir gamybinis vanduo (157)
		564.00	Mineralinis vanduo (27)
		1986.70	Nafta (6)
Injekcinis	2	1982.10	Nafta
Inžinerinis geologinis	3	220.00	
Kartografavimo gilusis	284	967.00	
Monitoringo	105	858.70	Požeminis vanduo
Nežinoma	2	201.40	
Paieškos	73	1998.40	Nafta (18)
		1068.90	Geležies rūda (40)
		736.00	Ertmės (3)
		618.00	Kitos iškasenos (12)
Parametrinis	7	1999.90	Nafta
Stebimasis	11	1999.90	Nafta(7),
		301.50	Mineralinis vanduo (4)
Struktūrinis	106	1781.90	Nafta
Žvalgybos	52	1413.00	Nafta

Išnagrinėjus Lietuvos geologinių duomenų prieinamumą, kiekį ir pobūdį, galima teigti, kad šie duomenys yra fragmentiški, dažniausiai gauti nestandartizuotais metodais arba naudoti standartai (pavyzdžiui, GOST grupė) yra nesuderinami su pasaulinės standartizacijos organizacijos (ISO) siūlomais standartais. Skirtingos uolienos yra tirtos siekiant skirtingų tikslų, o ištirtos uolienų ir sluoksnių savybės yra apibūdintos skirtingų parametrų vertėmis. Visa tai lemia, kad Lietuvoje turimi duomenys yra sunkiai palyginami tarpusavyje ir su kitose pasaulio šalyse vykdomų tyrimų rezultatais, kas vykdant tyrimus GA įrengimui ir saugos vertinimui yra itin svarbu.

2. POTENCIALIŲ GEOLOGINIŲ FORMACIJŲ TINKAMUMO GILUMINIO ATLIEKYNO ĮRENGIMUI VERTINIMO METODIKOS SUKŪRIMAS

2.1. Tinkamumo vertinimo metodikos sukūrimo principai

Vietos GA parinkimą sudaro keletas etapų. Kiekvieno etapo užbaigimui yra reikalinga priimti vertinamąjį sprendimą. Daugeliu atvejų sprendimai gali būti subjektyvūs ir priklausyti nuo skirtingų sprendimus priimančių asmenų nuomonių. Siekiant išvengti galimo subjektyvumo priimant sprendimus, reikėtų laikytis tam tikros vertinimo metodikos. Geologinės formacijos parinkimas GA įrengimui yra vienas iš vietos atliekynui parinkimo uždavinių. Parinkus optimaliai tinkamą formaciją apžvalginių geologinių tyrimų etape sudaroma galimybė sutrumpinti vietos parinkimo ir GA koncepcijos sukūrimo procesą. Pagal sukurtą metodiką geologinės formacijos parinkimas turi būti vykdomas įvertinant potencialių formacijų tinkamumą. Mano siūloma metodika yra grindžiama analitinio hierarchinio proceso (AHP) (Saaty 1995; Mendoza 1997; He et al. 2020) ir daugiakriterinio vertinimo (Hoseini, Kamrani, 2018) principais. Metodika yra sukurta atsižvelgiant į GA saugos pagrindus, saugos reikalavimus ir realias geologinių formacijų uolienų savybes, jose vykstančius procesus. Pirmiausiai, remiantis pasauline praktika ir vietine patirtimi, buvo nustatyti formacijos tinkamumo kriterijai, kurie apibūdinti geologiniais duomenimis. Geologiniai kriterijai buvo suskirstyti į grupes pagal tai, kokius hipotetinius GA elgsenos scenarijus gali lemti vienokia ar kitokia kriterijaus parametro vertė. Tinkamumo vertinimas gali būti atliekamas didžiausios palankių savybių tikimybės prioritetizavimo arba mažiausios nepalankių savybių ir scenarijų tikimybės prioritetizavimo principais. Pagal sukurtą geologinės formacijos tinkamumo vertinimo metodiką potencialiai tinkama GA įrengimui formacija yra laikoma tinkamesne tada, kai jos savybės ir slūgsojimo sąlygos lemia mažesnę nepalankių scenarijų tikimybę. Tai atitinka mažiausios nepalankių savybių ir scenarijų tikimybės principą. Metodikoje reikšmingiausiais laikomi tokie hipotetiniai GA elgsenos scenarijai, kurie galėtų lemti negrįžtamus mechaninius GA sistemos pažeidimus ar šios sistemos sugriuvimą, o mažiausiai reikšmingais - tokie scenarijai, kurie gali lemti palankesnes GA aplinkos savybes. Tokiu būdu buvo sukurta kriterijų hierarchija.

Siekiant parinkti geologinę formaciją GA įrengimui, turi būti įvertintas keleto potencialių geologinių formacijų tinkamumas. Atlikus vertinimą, geologinių formacijų tinkamumas turi būti palygintas. Geologinių formacijų tinkamumą galima palyginti tik tada, kai kiekviena formacija yra įvertinama pagal tam tikrą metodiką ir tuos pačius kriterijus. Be to, kiekvienam kriterijui apibūdinti skirtų tyrimų rezultatų kiekis kiekvienai formacijai turi būti panašus. Pavyzdžiui, jei vertinamos dvi skirtingo

geologinio ištirtumo formacijos, jų lyginimui turi būti imamas toks tyrimų rezultatų skaičius, koks yra būdingas mažiau ištirtai formacijai.

2.2. Potencialių geologinių formacijų tinkamumo kriterijai

2.2.1. Kriterijų nustatymas

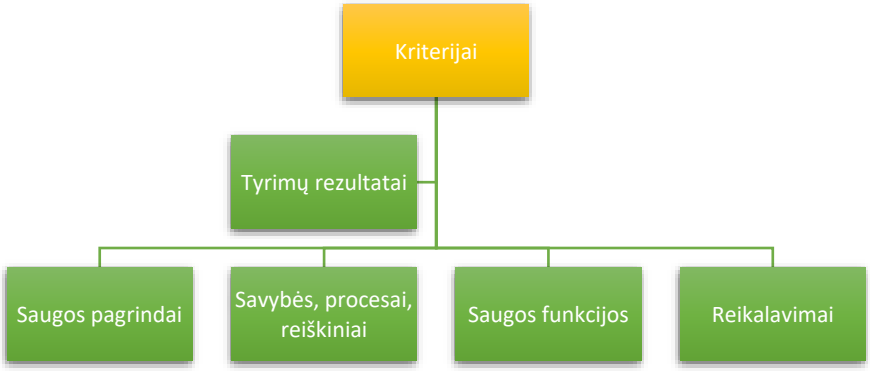
Bet kuri savybė, procesas ar reiškinys gali būti laikomas vienokiu ar kitokiu kriterijumi, jeigu juo remiantis yra galimybė priimti tam tikrą sprendimą. Kaip jau minėta, potencialiai tinkamos geologinės formacijos yra išskiriamos pagal sąlygų įrengti GA palankumą (Savage et al., 1995). Šias sąlygas apibūdina tam tikri veiksniai (4 lentelė) arba savybės, procesai ir reiškiniai (toliau - SPR), kurie turi atitikti įvairiuose tarptautinių organizacijų (TATENA, NEA ir kt.) dokumentuose (IAEA, 1981, IAEA, 2006, IAEA, 2011 a, IAEA, 2011 b ir kt.) ir šalies teisės aktuose įvardintus pagrindinius GA saugos principus ir įrengimo reikalavimus:

- GA turi būti įrengtas pakankamai giliai, kad jis neatsidurtų žemės paviršiuje veikiant geologiniams procesams (pvz., vykstant žemės paviršiaus erozijai, kylant žemės paviršiui) tiek laiko, kol radioaktyvumas jame yra didesnis už nekontroliuojamus lygius;
- parinkta geologinė formacija turi būti pakankamo storio ir ploto, kad aplink GA būtų pakankamo storio apsauginė zona, kurios išorinės ribos būtų pakankamai nutolusios nuo žemiau ir aukščiau slūgsančių sluoksnių, tektoninių zonų ir kt.;
- geologinė struktūra, kurioje numatoma įrengti GA, ir ją supančios struktūros turi būti stabilios kol RA taps nepavojingomis ekosistemai;
- GA turi būti įrengtas tokioje vietoje, kur ateityje būtų netikslinga vykdyti paieškos ir žvalgybos darbus, galinčius jį dehermetizuoti;
- GA hidrogeologinė aplinka turi būti tokia, kad iki minimumo eliminuotų tekančio vandens ir RA sąlyčio galimybę;
- GA turi būti įrengtas taip, kad jis neturėtų neigiamo poveikio supančiai geologinei aplinkai arba pagerintų jos izoliacines savybes;
- GA inžinerinės konstrukcijos ir geologinė aplinka turi būti atsparūs radiaciniam ir šiluminiam poveikiui;
- GA turi būti įrengtas taip, kad ir pažeidus jo inžinerines konstrukcijas būtų minimali radionuklidų patekimo į aplinką galimybė.

4 lentelė. Geologiniai veiksniai, susiję su GA reikalavimais ir saugos funkcijomis (Kanopienė, Gadeikis, 2022).

Reikalavimai GA	Geologiniai veiksniai
GA konstrukcijos turi būti pakankamo tūrio numatytam RA kiekiui sutvarkyti	pakankamas gylis
	tinkamos fizikinės ir mechaninės savybės
	pakankamas uolienos storis
GA sistema turi būti stabili ilgą laiką	stabilios tektoninės sąlygos
	aplinkos atsparumas klimato pokyčiams
	naudingųjų iškasenų nebuvimas dabartyje ir ateityje
	žemas teritorijos seisminis aktyvumas
	žemas žemės plutos judesių intensyvumas
	labai maža vulkanizmo tikimybė
Artimiausioje sutvarkytų RA aplinkoje neturi būti vandens	hidraulinio ryšio tarp GA kasinių ir žemės paviršiaus nebuvimas
	labai lėtas požeminio vandens ir drėgmės judėjimas
	stabilios hidrocheminės sąlygos
	radionuklidų sulaikymas geologinės formacijos viduje
GA įrengimas neturėtų padidinti aplinkos laidumo skysčiams ir dujoms, o galėtų jį sumažinti.	procesai, lemiantys mažesnį uolienos laidumą (plyšių užsidarymas, naujų mineralų susidarymas ir kt.)
	procesai didinantys uolienos sorbcinę gebą
	procesai, lemiantys redukcines aplinkos sąlygas

Tiek vietos, tiek aplinkos tinkamumą GA galima vertinti panaudojant įvairius kriterijus. Jie gali būti nustatomi analizuojant socialines, politines, ekonomines ar gamtines, tarp jų ir geologines, sąlygas. Geologinė formacija yra gamtinis kūnas, pasižymintis savybėmis, kurios gali būti apibūdintos tik atliekant geologinius tyrimus, todėl šiame darbe analizuojami tik geologiniai formacijos tinkamumo GA kriterijai, t. y. SPR, kurie gali būti identifikuoti, apibūdinti ir įvertinti panaudojant geologinių tyrimų duomenis (Kanopienė, Gadeikis, 2022). Siekiant įvertinti galimybę įrengti GA ir geologinės formacijos tinkamumą šiam tikslui, vertinimo kriterijai turi būti ne bet kurios uolienų savybės ar jose vykstantys procesai ir reiškiniai. Kriterijų nustatymui yra nagrinėjama hipotetinė GA sistemos elgsena statybos etape, vykstant eksploatacijai ir laikotarpiu po uždarymo. Tam, kad uolienos ar geologinės aplinkos savybę reiškinį ar procesą būtų galima laikyti kriterijumi, ta savybė reiškinys ar procesas turi apibūdinti geologinius veiksnius, nurodytus 4 lentelėje. Kriterijai turi lemti GA sistemos elgseną ir saugos funkcijas, t. y. būti pagrįsti nustatytais principais ir standartais (9 pav.). Pavyzdžiui, intensyvus tektoninis žemės plutos kilimas gali sukelti geologinės formacijos atsiradimą žemės paviršiuje. Deformacijos dėl tektoninių judesių gali pažeisti inžinerinius GA statinius arba sukelti lūžių zonų, veikiančių kaip dujų ir skysčių transportavimo keliai geologinėse formacijose, atsiradimą. Be to, kiekvienas geologinis veiksnys gali būti apibūdinamas vienu ar keliais kriterijais, o vienas kriterijus gali apibūdinti kelis veiksnius. Pavyzdžiui, veiksnys „tinkamos uolienų savybės“ gali būti apibūdinamas tūrio tankiu, šiluminiu laidumu, gniuždomuoju stiprumu ir kitais parametrais, naudojamais kaip kriterijai. Kita vertus, kriterijus „uolienų pralaidumas“ yra susijęs su sistemos izoliacijos savybių veiksniais ir radionuklidų sulaikymo galimybe. Pagal pasaulinę praktiką kiekvienas kriterijus turėtų būti nustatytas remiantis atitinkamų tyrimų rezultatais arba kokybiškai įvertintas ir patvirtintas bent keleto profesionalių ekspertų.



9 pav. Kriterijų nustatymo schema.

Siekiant nustatyti geologinių formacijų tinkamumo kriterijus apibūdinančių parametrų vertes ar galimus šių verčių intervalus, reikalinga išanalizuoti savybių parametrų tyrimų rezultatus. Jei specialūs tyrimai tam tikrų savybių parametrams nustatyti nėra atlikti bent vienai iš vertinamų geologinių formacijų, nustatyto kriterijaus parametro vertės gali būti vertinamos tik kokybiškai.

Įvertinus pastarųjų dviejų dešimtmečių geologinių tyrimų GA įrengimui Lietuvoje patirtį, galima teigti, kad potencialios geologinės formacijos buvo išskirtos remiantis teritorijos neotektoninių judesių intensyvumo, geologinių sluoksnių geometriniais, laidumo skysčiams bei dujoms savybių parametrais.

Bet kuriam vertinimui atlikti savybės, procesai ar reiškiniai turi būti apibūdinti parametrų vertėmis. Parametrų vertės gali būti išreikštos tiek kiekybiškai, tiek kokybiškai. Minėti potencialių GA formacijų išskyrimui panaudoti parametrai buvo apibūdinti mažu neotektoninių judesių intensyvumu, didesniu nei 200 m gyliu nuo žemės paviršiaus, ne mažesniu nei 50 m storiu, mažu laidumu skysčiams bei dujoms. Galima teigti, kad tokiu būdu buvo nustatyti pagrindiniai geologinės formacijos tinkamumo GA kriterijai.

2.2.2. Vertinimo kriterijų reikšmingumo grupės

Analizuojant planuojamo GA tikėtiną elgseną pagrindinis dėmesys skiriamas objekto saugai. Šios analizės metu nustatoma uolienos savybių, procesų ir reiškinių svarba įvairiems GA elgsenos scenarijams. Vertinimas gali būti atliekamas didžiausios palankių savybių tikimybės prioritetizavimo arba mažiausios nepalankių savybių ir scenarijų tikimybės prioritetizavimo principais. Pagal sukurtą geologinės formacijos tinkamumo vertinimo metodiką potencialiai tinkama GA įrengimui formacija yra laikoma tinkamesne tada, kai jos savybės ir slūgsojimo sąlygos lemia mažesnę nepalankių scenarijų tikimybę. Tai atitinka mažiausios nepalankių savybių ir scenarijų tikimybės principą. Metodikoje reikšmingiausiais laikomi tokie hipotetiniai GA elgsenos scenarijai, kurie galėtų lemti negrįžtamus mechaninius GA sistemos pažeidimus ar šios sistemos sugriuvimą. Šie scenarijai metodikoje sąlyginai vadinami katastrofiniais.

Kita scenarijų grupė apima tuos, kurie galėtų sukelti greitą radionuklidų sklaidą už GA sistemos ribų. Greitą radionuklidų sklaidą gali lemti intensyvi požeminio vandens filtracija GA aplinkoje, požeminio vandens (tirpalo) cheminė sudėtis ar radionuklidų tirpumas. Tokia radionuklidų sklaida galėtų būti vadinama avarine, todėl tokie GA sistemos elgsenos scenarijai ir juos apibūdinantys kriterijai metodikoje sąlyginai vadinami avariniais.

Geologiniai veiksniai, kurie šiuo metu dar nėra pakankamai ištirti arba jų ilgalaikė įtaka GA sistemai nėra pakankamai įvertinta, gali sąlygoti neprognozuojamą GA sistemos elgseną ateityje. Tokios GA sistemos elgsenos scenarijai yra neprognozuojami, o jų apibūdinime ir modeliavime yra daug neapibrėžtumų. Tokie GA sistemos elgsenos scenarijai metodikoje vadinami neapibrėžtumo scenarijais ir priskiriami trečiajai reikšmingumo grupei.

Įvairių tyrimų, tokių kaip “Euridice” projekto SELFRAC eksperimentiniai tyrimai Belgijos “Hades“ požeminėje laboratorijoje (Coll et al, 2004), rezultatai rodo, kad egzistuoja keletas geologinių veiksnių, kurie gali pagerinti geologinių formacijų mechanines ar filtracines savybes, pavyzdžiui, plyšių savaiminis išnykimas. Tokių geologinių veiksnių nulemti GA sistemos elgsenos scenarijai metodikoje sąlyginai vadinami savybių pagerinimo scenarijais ir priskiriami ketvirtajai scenarijų grupei .

Geologinių veiksnių ir juos apibūdinančių kriterijų grupėms metodikos galutiniam geologinių formacijų tinkamumo skaičiavimui suteikiamas svarbos rangas (SR), kuris galutinėje tinkamumo skaičiavimo formulėje yra daugiklis nuo 1 iki 4 (5 lentelė).

5 lentelė. Geologiniai veiksniai, lemiantys GA elgsenos scenarijus.

Svarbos rangas (SR)	GA elgsenos scenarijai	Geologiniai veiksniai
4	Mechaninio GA sistemos pažeidimo ar sugriuvimo (katastrofiniai)	Formacijos tūris ir fizikinės - mechaninės savybės.
		Tektoninis režimas.
		Naudingųjų iškasenų paieška.
3	Greitos radionuklidų sklaidos už GA ribų (avariniai)	Hidraulinis ryšys su žmogaus gyvenamąja aplinka
		Požeminio vandens judėjimas
		Radionuklidų pernaša
2	Neapibrėžtumų radionuklidų sklaidos prognozavime (neapibrėžtumo)	Neapibrėžtumai dėl slūgsojimo sąlygų
		Neapibrėžtumai dėl klimato kaitos
		Geologinės formacijos pokyčiai dėl GA įrengimo
1	Geologinės formacijos izoliacinių savybių pagerėjimo (pagerinimo)	Savaiminio plyšių išnykimo tikimybė
		Geresnių sorbcinių savybių mineralų susidarymas

Pakankamas formacijos gylis yra teisės aktais nustatytas kriterijus (VATESI, 2016) potencialios geologinės formacijos tinkamumo vertinimui. Atsižvelgiant į didelį kiekį duomenų (gręžinių duomenys) šis kriterijus gali būti vertinamas kiekybiškai. Kritinė minimali formacijos slūgsojimo gylio vertė yra 200 m., o maksimali sukurtoje metodikoje yra 700 m. Maksimalios vertės pagrindimui pasinaudota pirmiausiai pasauline praktika, nes planuojamas GA gylis pasaulyje retai kada viršija 700 m. Šiai vertei nustatyti taip pat panaudoti geoterminio gradiento (Šliaupa, 2019) tyrimų ir kasybos sąlygų Lietuvoje duomenys. Šis kriterijus yra pirmojoje svarbiausio rango grupėje, todėl yra reikalinga nustatyti 5 vertinimo intervalų vertes. Tokiu būdu slūgsojimo gylis < 200 m yra vertinamas 0 balų, atvejis, kai nėra duomenų - 1 balu, gylis > 700 m vertinamas 2 balais, jei geologinė formacija slūgso nuo 200 iki 500 m gylyje, gylis vertinamas 3 balais. Optimali formacijos

slūgsojimo gylio vertė sukurtoje metodikoje yra laikoma nuo 500 iki 700 m ir šis gylio intervalas vertinamas 5 balais.

Pakankamas geologinės formacijos storis yra viena svarbiausių galimybę įrengti GA sąlygų. Sukurtoje metodikoje nustatoma tik minimali šio parametro vertė 50 m, nes juo didesnis formacijos storis, tuo tinkamesnės sąlygos įrengti GA. Minimali storio vertė sukurtoje metodikoje buvo nustatyta pagal pasaulinę GA planavimo praktiką, įvairių tarptautinių projektų radionuklidų sklaidos modeliavimo duomenis ir Lietuvos geologinių sąlygų tyrimų rezultatus. Įrengiant GA formacijos vertikalaus pjūvio viduryje tiek virš jo, tiek giliau slūgso bent 20 m storio potencialiai tinkamos formacijos sluoksniai, užtikrinantys, kad galimos teršiančios medžiagos iš GA iki formacijos kraigo ir pado migruos pakankamai ilgą laiką, užtikrinantį nekontroliuojamą jonizuojančios spinduliuotės lygį (Selzer et al., 2024). Šis kriterijus yra svarbiausio rango grupėje, todėl yra reikalinga nustatyti 5 vertinimo intervalų vertes. Tokiu būdu storis < 50 m yra vertinamas 0 balų, atvejis, kai nėra duomenų - 1 balu, storis tarp 50 ir 70 m vertinamas 2 balais, storio intervalas nuo 70 iki 100 m vertinamas 3 balais. Optimali formacijos storio vertė sukurtoje metodikoje yra laikoma > 100 m ir vertinama 5 tinkamumo balais.

Formacijos paplitimo plotas yra trečiasis geometrinis parametras, lemiantis galimybę įrengti saugų GA. Geologinės formacijos plotui yra nustatoma tik minimali kritinė vertė, nes juo didesnis formacijos paplitimo plotas, tuo tinkamesnės sąlygos įrengti GA. Minimalią geologinės formacijos paplitimo ploto vertę lemia paviršiniai GA aikštelės statiniai, atstumas tarp RA pakuotėms skirtų tunelių, planuojamų dėti į GA atliekų kiekis, t. y. tunelių skaičius, bendra GA projekto koncepcija ir daugelis kitų aplinkybių. Lietuvoje šiuo metu nėra patvirtintos GA koncepcijos ir parinktos GA aikštelės, todėl minimalus geologinės formacijos paplitimo plotas sukurtoje metodikoje (10 km²) nustatytas toks, kad būtų tinkamas įvairioms koncepcijoms, kad modeliuojant radionuklidų sklaidą iš GA, vertikalios modelio ribos būtų pakankamai toli, palyginti su tikėtinu medžiagos pernašos atstumu (Gregorauskas ir kt., 2017, Selzer et al., 2024). Geologinės formacijos paplitimo ploto vertės sukurtoje metodikoje yra: < 10 km² (0 balų), nėra duomenų (1 balas), nuo 10 iki 50 km² (2 balai), nuo 50 iki 70 km ² (3 balai), nuo 70 iki 100 km² (4 balai) ir > 100 km² (5 balai).

Mechaninį GA stabilumą lemia tinkamos fizinės ir mechaninės uolienos savybės. Šių savybių tyrimų potencialių formacijų uolienoms Lietuvoje yra atlikta labai mažai. Tyrimų vietos dažniausiai sutampa su naudingųjų iškasenų (anhidritas, akmens druska, geležies rūda) paieška ir

žvalgyba. Atsižvelgiant į sukurtos metodikos principus tinkamumo vertinimui turi būti naudojami tie patys parametrai, nustatyti visų formacijų, kurių tinkamumas yra vertinamas, uolienoms. Šiuo metu Lietuvoje yra atlikta gana mažai giliau negu 200 m slūgsančių uolienų ar gruntų fizinių savybių tyrimų. Pavyzdžiui, kristalinio pamato uolienų gamtinis tankis visoje Lietuvos teritorijoje yra nustatytas apie 300 bandinių, o apatinio triaso molingų uolienų ir gruntų – tik apie 20 bandinių, paimtų vos iš vieno gręžinio (Pagiriai – 6). Apatinio kambro molingų uolienų (ar gruntų) gamtinis tankis šiuo metu yra vertinamas pagal geofizinių tyrimų rezultatus, o dokumentuotų tiesioginių laboratorinių tyrimų rezultatų valstybinėje geologijos informacinėje sistemoje (GEOLIS) nėra. Atsižvelgiant į Lietuvos potencialių formacijų savybių ištirtumą jų tinkamumo vertinimui yra nustatytas gamtinio tankio kriterijus. **Uolienos tankis** lemia ne tik uolienos tankumą, bet ir yra susijęs su stiprumu ir poringumu, todėl yra reikšmingas mechaninio GA sistemos stabilumo apibūdinimui. Minimali kritinė gamtinio tankio vertė yra nustatyta 1800 kg/m³, nes mažesnio tankio uolienos yra poringos ir dažnai pasižymi nepakankamu stiprumu (tinkamumo vertinimo balas 0). Vertinant kasybos ir GA statybos sąlygas sukurtoje geologinių formacijų tinkamumo vertinimo metodikoje nustatyta ir maksimali kritinė gamtinio tankio vertė 2600 kg/m³. Didesniu gamtiniu tankiu paprastai pasižymi kristalinės metamorfizuotos didelio stiprumo uolienos, kuriose kasybos ir statybos sąlygos yra apsunkintos, o tunelių ir šachtų įrengimui dažnai reikalinga sprogdinimo technologija (tinkamumas vertinamas 2 balais). Gamtinio tankio verčių intervalo nuo 1800 iki 2200 kg/m³ tinkamumas sukurtoje metodikoje vertinamas 3 balais, o intervalo nuo 2200 iki 2600 kg/m³ tinkamumas - 5 balais.

Stabilaus tektoninio režimo apibūdinimui sukurtoje metodikoje yra nustatyti vertikalių (neotektoninių) žemės paviršiaus judesių amplitudės ir atstumo iki tektoninio lūžio kriterijai. Metodikoje priimta vertikalių žemės paviršiaus judesių amplitudės minimali vertė 1 mm/m, kuri tik nežymiai viršija skaičiavimų paklaidos ribą (Zakarevičius, 2003), o potencialios formacijos tinkamumas, kai jos paplitimo plote šio parametro vertė yra mažesnė, vertinamas 5 balais. Metodikoje nustatyta maksimali vertė 5 mm/m. Tokios amplitudės Lietuvoje nėra išmatuotos ar apskaičiuotos (Zakarevičius, 2003). Esant didesnei vertikalių žemės paviršiaus judesių amplitudei, formacija laikoma netinkama (tinkamumo balas 0). Atsižvelgiant į minimalų tinkamos geologinės formacijos paplitimo plotą, atstumo iki tektoninio lūžio minimali vertė nustatyta < 5 km. Juo šis atstumas didesnis, tuo didesnis ir formacijos tinkamumas. Atsižvelgiant į Lietuvos teritorijos plotą, didesnis nei 50 km atstumas iki lūžio metodikoje vertinamas 5 balais.

Kaip mechaninio GA sistemos pažeidimo galimybę nusakantis yra nustatytas atstumo iki naudingųjų iškasenų paplitimo ploto kriterijus. Jei atstumas iki šiuo metu žinomų naudingųjų iškasenų ploto yra mažesnis nei 5 km, geologinė formacija laikoma netinkama, o atstumas didesnis už 50 km sukurtoje metodikoje laikomas neturinčiu įtakos GA sistemai ir geologinės formacijos tinkamumas vertinamas kaip maksimalus (5 balai).

Antrąją, greitos pernašos arba avarinių GA elgsenos scenarijų tikimybę apibūdinančių ir sulaikymo - sulėtinimo saugos funkciją užtikrinančių kriterijų, grupę (svarbos rangas SR yra 3) sukurtoje metodikoje sudaro kriterijai, nusakantys galimą GA hidraulinį ryšį su ekosfera, požeminio vandens filtracijos greitį ir radionuklidų pernašos intensyvumą. Visos geologinės formacijos, kurių tinkamumas GA įrengimui yra vertinamas, yra mažai laidžiuose sluoksniuose, slūgsančiuose spūdinėse hidrogeologinėse sistemose. Šios sistemos Lietuvoje buvo tiriamos požeminio vandens išteklių ir taršos nuo žemės paviršiaus migracijos požiūriu (Juodkazis, Paltanavičius, 1971). Siekiant kiekybiškai įvertinti požeminio vandens pertekėjimą per mažai laidžius sluoksnius, sudėtingos gamtinės hidrogeologinės sąlygos yra supaprastinamos remiantis šiomis pagrindinėmis prielaidomis:

- pertekėjimą lemiantis slėgis vandeninguosiuose sluoksniuose yra pastovus;
- vandeningųjų ir mažai laidžių sluoksnių filtracinių savybių skirtumas yra toks didelis, kad vandeningajame sluoksnyje vandens filtracija yra horizontali, o mažai laidžiame – vertikali;
- vandens kiekis mažai laidžiame sluoksnyje yra palyginti mažas, todėl, atliekant išteklių skaičiavimus, galima jo nepaisyti.

Hidrauliniam ryšiui su ekosfera apibūdinti sukurtoje metodikoje yra nustatytas mažai laidžių skysčiams uolienų kiekio vertinamos formacijos dangoje kriterijus. Mažai laidžiomis uolienomis šiuo atveju laikomos tokios uolienos, kuriose laikoma, kad požeminio vandens filtracija yra vertikali, o filtracijos koeficiento vertės neviršija 10^{-8} m/s eilės (Paltanavičius, 1979). Šiam kriterijui nustatyta minimali kritinė vertė 10%, kuriai suteiktas minimalus tinkamumo vertinimo balas (1). Informacijos nebuvimo atvejis įvertintas 2 tinkamumo balais. Išnagrinėjus giliųjų gręžinių duomenis, galima teigti, kad dažniausiai pasitaikantis mažai laidžių uolienų kiekis Lietuvos teritorijos nuosėdinių uolienų pjūvyje sudaro nuo 10 iki 50 % viso uolienų storio (Paltanavičius, 1974). Šis verčių intervalas metodikoje įvertintas 3 tinkamumo balais. Analizuojamą geologinę formaciją dengianti storymė,

kurią sudaro daugiau kaip 50 % mažai laidžių uolienų yra vertinama 4 tinkamumo balais. Galimą GA ryšį su ekosfera apibūdina ir vandeningųjų sluoksnių buvimas geologinėje aplinkoje. Metodikoje nustatytas vandeningųjų sluoksnių skaičiaus kriterijus. Maksimali šio kriterijaus vertė metodikoje nustatyta > 5 vertinama 1 tinkamumo balu, duomenų nebuvimas vertinamas 2 balais, vandeningųjų sluoksnių skaičius nuo 5 iki 3 vertinamas 3 balais, < 3 - 4 balais. Paleojėrėžiai – tai gilūs (50 – 300 m), siauri (0,5 – 2 km pločio), stačiašlaičiai (šlaitų polinkis gali siekti 40° – 45°) slėniai, kurie dažniausiai būna užpildyti biriomis nuogulomis, kuriose požeminio vandens filtracija yra žymiai intensyvesnė negu aplinkinėse nuogulose. Paleojėrėžiai geologiniame pjūvyje dažnai yra vadinami hidrogeologiniais žemės gelmių " langais" arba "filtracijos greitkeliais" (Kondratas, 1969) todėl sukurtoje metodikoje yra nustatytas atstumo iki paleojėrėžio kriterijus. Jo minimali kritinė vertė - iki 10 km (1 tinkamumo balas), o didesnis nei 30 km atstumas įvertintas 4 tinkamumo balais.

Požeminio vandens ar drėgmės migracijos intensyvumui apibūdinti sukurtoje metodikoje yra nustatyti geologinės formacijos filtracijos koeficiento ir migracijos krypties kriterijai. Lietuvoje spūdinio vandens pertekėjimo per mažai laidžius sluoksnius sąlygos ir mažai laidžių sluoksnių filtracinės savybės buvo analizuojamos J. Paltanavičiaus darbuose (Paltanavičius, 1974, 1979). Maksimali kritinė potencialios geologinės formacijos filtracijos koeficiento vertė sukurtoje metodikoje yra 10^{-9} m/s. Tai atitinka sąlyginės vandensparos filtracijos koeficiento vertę (10^{-5} m/d). Jai suteiktas mažiausias tinkamumo balas (1). Jei nėra formacijos filtracijos koeficiento kiekybinių duomenų, kriterijus vertinamas 2 tinkamumo balais. Verčių intervalas nuo 10^{-9} iki 10^{-12} m/s vertinamas 3 tinkamumo balais, o filtracijos koeficientas mažesnis už 10^{-12} m/s vertinamas 4 balais. Požeminio vandens vertikalios migracijos formacijoje (pertekėjimo) kryptis vertinama kokybiškai. Mažiausiai palankios sąlygos yra tokios, kai drėgmės migracija vyksta iš apačios į viršų, t. y. iš GA žmogaus gyvenamosios aplinkos link. Pertekėjimo krypties vertei "aukštyn" sukurtoje metodikoje priskirtas 1 tinkamumo balas. Jei nėra duomenų drėgmės migracijos krypčiai nustatyti, kriterijus vertinamas 2 balais. Kriterijaus vertė "žemyn" vertinama 3 tinkamumo balais, o palankiausias GA sąlygas nusakanti vertė "viename lygyje" vertinama 4 tinkamumo balais.

Radionuklidų pernašai apibūdinti sukurtoje metodikoje yra nustatyti tirpalo mineralizacijos ir radionuklidų tirpinimo kriterijai. Šių kriterijų vertės, nesant giliųjų gręžinių ir tyrimų juose rezultatų, gali būti tik kokybinės. Esant didelei tirpalo mineralizacijai jame mažiau tirpsta aplink esančios medžiagos

(uoliena, dujos). Mažiausias (1) tinkamumo balas metodikoje priskirtas vertei “neprisotintas tirpalas”, reikšmei “nėra duomenų” - 2 balai, reikšmei “prisotintas tirpalas” - 4 tinkamumo balai. Radionuklidų tirpinimas požeminiame vandenyje šiuo metu taip pat gali būti vertinamas tik kokybiškai. Šis procesas yra susijęs tiek su tirpalo, tiek su paties radionuklido savybėmis. Tirpinimo procesas gali būti apibūdintas tik turint tiesioginių tyrimų rezultatus. Kriterijaus reikšmei “didelis” sukurtoje metodikoje priskiriamas minimalus tinkamumo balas (1), reikšmė “nėra duomenų” vertinama 2 balais, o reikšmė “mažas” - 4 tinkamumo balais.

Kaip minėta, Lietuvoje šiuo metu vykdomi apžvalginių GA vietos parinkimo geologinių tyrimų etapo uždaviniai. Šiame etape vertinti GA elgsenos neapibrėžtumus yra sudėtinga, nes nėra atliktų tiesioginių tyrimų rezultatų. Sukurtoje metodikoje vertinami neapibrėžtumai, galintys turėti įtakos GA sistemos elgsenai ilguoju laikotarpiu, yra susiję su geologinės formacijos sandara ir slūgsojimo sąlygomis, su klimato pokyčiais ir su tikėtina GA statybos įtaka.

Trečiosios grupės kriterijų svarbos rangas (SR) yra 2. Potencialios formacijos sandaros sudėtingumas sukurtoje metodikoje apibūdinamas plyšių tankio ir tarpsluoksnių skaičiaus kriterijais. Plyšių tankio kriterijui, remiantis pasauline praktika ir literatūros šaltiniais (Tóth et al., 2022, Elliott et al., 2025), yra nustatyta maksimali kritinė 1 plyšio kubiniame metre formacijos tūrio vertė. Kriterijaus vertei >1 priskirtas 1 tinkamumo balas, reikšmei “nėra duomenų” - 2 balai, o vertei < 1 - 3 tinkamumo balai. Vertinant neapibrėžtumus tarpsluoksniai yra vertinami kaip veiksniai, galintys įtakoti modeliuojamas parametrų vertes. Tai ne skirtingo laidumo fliuidams sluoksniai, kurių parametrai gali būti įvertinti, o tarpsluoksniai, išskiriami dėl skirtingų sedimentacijos ar kristalizacijos sąlygų, uolienos cheminės ar mineraloginės sudėties ir „sujaukiantys“ medžiagų migracijos kryptis. Kriterijui tarpsluoksnių skaičius yra nustatyta maksimali kritinė vertė >3, kuriai priskirtas minimalus tinkamumo balas (1). Kriterijaus reikšmė “nėra duomenų” vertinama 2 balais, o palankiausios sąlygos, kai potencialioje formacijoje identifikuota mažiau 3 tarpsluoksnių, vertinamos 3 balais. Temperatūros pokyčių tikimybės ir kontinentinio apledėjimo tikimybės kriterijai sukurtoje metodikoje vertinami kokybiškai. Šių kriterijų reikšmės yra “didelė” (1 balas), “nėra duomenų” (2 balai) ir “maža” (3 balai). Galimi formacijos pokyčiai dėl GA įrengimo sukurtoje metodikoje apibūdinami formacijos silpnėjimo galimybės ir plyšių susidarymo tikimybės kriterijais, kurie taip pat gali būti vertinami tik kokybiškai. Formacijos silpnėjimo galimybės kriterijau reikšmės yra “galimas” (1 balas), “nėra duomenų” (2

balai), “galimybės nėra” (3 balai). Plyšių susidarymo tikimybės kriterijau reikšmės yra “didelė tikimybė” (1 balas), “nėra duomenų” (2 balai) ir “maža tikimybė” (3 balai).

Galimą potencialios formacijos izoliacinių savybių pagerėjimą apibūdinantys kriterijai, atsižvelgiant į anksčiau minėtus tinkamumo vertinimo metodikos principus, priskiriami ketvirtajai, mažiausiai svarbių formacijos tinkamumo vertinime, kriterijų grupei (svarbos rangas SR = 1). Šioje grupėje nustatyti plyšio savaiminio išnykimo (“užsigydymo”) tikimybės ir didesnę sorbcinę gebą turinčių mineralų susidarymo tikimybės kriterijai. Jie vertinami kokybiškai, nes šių procesų tyrimai Lietuvos potencialių geologinių formacijų uolienoms nėra atlikti. Plyšių savaiminio išnykimo kriterijaus reikšmėms “tikimybės nėra” ir “”nėra duomenų” sukurtoje metodikoje priskirtas 1 tinkamumo balas, o reikšmei “tikėtinas” - 2 balai. Didesnės sorbcinės gebos mineralų susidarymo kriterijaus reikšmėms “nesusidaro” ir “nėra duomenų” metodikoje priskirtas 1 tinkamumo balas, reikšmei “susidaro” - 2 balai.

2.2.3. Kriterijų reikšmingumo nustatymas grupėse

Sugrupavus kriterijus ir nustačius jų grupių rangą, yra svarbu nustatyti kriterijų svertinius koeficientus kiekvienoje grupėje. Sukurtoje metodikoje jis trumpiau vadinamas kriterijaus reikšmingumo reitingu (RR). Šis koeficientas reiškia, kiek svarbus yra kiekvienas kriterijus palyginti su kitais toje pačioje grupėje. Tai galima pavadinti kriterijų svertiniu vertinimu (Ahlroth et al. 2011, Iwaro et al. 2014). Literatūroje aprašyti keletas tokio vertinimo metodų (Odu 2019). Sukurtoje metodikoje siūloma taikyti porų palyginimo metodą. Tai metodas, kai kiekvieno kriterijaus svarba GA elgsenai ir GA sistemos saugai yra lyginama su kiekvieno kito tos grupės kriterijaus svarba sudarant poras. Analitinio hierarchijos proceso balai sukurtoje metodikoje kriterijų reitingams nesuteikiami, nes kriterijai kiekvienoje grupėje nėra atsitiktiniai. Jie dažnai yra priklausomi vienas nuo kito arba apibūdina tą patį geologinį veiksnį. Visi kriterijai yra lyginami vienas su kitu ir nustatoma, kiek kartų vienas kriterijus yra svarbesnis už kitą (6 lentelė). Todėl palyginimų skaičius taip pat priklauso nuo kriterijų skaičiaus grupėje. Visų vienos grupės kriterijų bendras reikšmingumas prilyginamas 1. Kiekvieno kriterijaus reikšmingumo reitingas gali būti suprantamas kaip kriterijų grupės bendro svorio dalis arba procentinė dalis.

6 lentelė. Keturių kriterijų grupės kriterijų reikšmingumo reitingo nustatymo pavyzdys.

Kriterijai	A	B	C	D
A		B<A (1: 2)	C<A (1: 1,5)	D< A (1: 1,5)
B	A>B (2:1)		C< B (1: 2)	D < B (1: 2)
C	A>C (1,5 : 1)	B > C (2: 1)		D =C (1: 1)
D	A>D (1,5 : 1)	B>D (1,5 : 1)	C = D (1 : 1)	

Pagal 6 lentelę kiekvieno kriterijaus reikšmingumo reitingas yra suskaičiuojamas atsižvelgiant į palyginimo santykį su kitais kriterijais. Visi kriterijai išreiškiami vienu iš jų, o kriterijų suma prilyginama 1. Lentelėje pateikto pavyzdžio atveju sudaromos ir išsprendžiamos lygtys:

A+0,5A+0,66A+0,66A=1; A=0,3548;

2B+B+0,5B+0,5B=1; B=0,25;

1,5C+2C+C+C=1; C=0,1818

1,5D+1,5D+D+D; D=0,2.

Tolesnių skaičiavimų supaprastinimui gautos svorių vertės gali būti suapvalinamos. Pateikto pavyzdžio atveju A=0,35, B=0,25; C=0,2 ir D=0,2.

Pirmosios grupės kriterijai palyginami pagal pateiktą pavyzdį sudarant lentelę 8 kriterijams. Pirmieji trys kriterijai (gylis, storis ir gamtinis tankis) yra svarbiausi ir tarpusavyje vienodos svarbos, Kriterijai Nr. 4, 5 ir 8 (paplitimo plotas, vertikalūs plutos judesiai ir atstumas iki naudingųjų iškasenų) yra 2 kartus mažiau svarbūs negu pirmieji trys ir tarpusavyje vienodos svarbos. Kriterijai Nr. 6 ir 7 (atstumas iki lūžio ir vulkanizmo tikimybė) grupėje pripažinti mažiausiai svarbiais. Santykis su pirmaisiais trimis priimtas 1: 4, o su 4, 5 ir 8 – 1: 2. Santykiai tarp kriterijų priimti atsižvelgiant į tai, kiek jie yra svarbūs GA saugai ir kiek jų vertės yra kaičios Lietuvos teritorijos sąlygomis. Kaip minėta, kriterijų reikšmingumas grupėse nustatomas ekspertinio vertinimo būdu, todėl, vertinant skirtingiems ekspertams, jie gali skirtis. Pagal nustatytus santykius tarp kriterijų atlikus skaičiavimus gaunama, kad kriterijų Nr. 1, 2 ir 3 reikšmingumo reitingas (RR) yra 0,2, kriterijų Nr. 5, 6 ir 8 – 0,1, o kriterijų Nr. 6 ir 7 – 0,05.

Antrajai grupei sukurtoje metodikoje yra priskirti 7 kriterijai (Nr. 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15). Reikšmingiausi galutiniam vertinimui yra mažai laidžių uolienų dalies geologinės formacijos dangoje ir geologinės formacijos filtracijos koeficiento kriterijai. Jų reikšmingumo reitingas (RR), atlikus palyginimus ir skaičiavimus pagal 6 lentelėje pateiktą pavyzdį, nustatytas 0,25. Pertekėjimo per mažai laidžias uolienas (vertikalios filtracijos) krypties kriterijus, nors ir vertinamas kokybiškai yra gana svarbus šioje grupėje (RR = 0,2), nes apibūdina galimybę radionuklidams patekti į ekosferą. Mažiau svarbūs šioje grupėje yra vandeningųjų sluoksnių skaičiaus geologinės formacijos dangoje ir atstumo iki paleojrėžio kriterijai. Jiems yra apskaičiuotas 0,1 reikšmingumo reitingas. Mažiausiai reikšmingais šioje kriterijų grupėje pagal sukurtą metodiką laikomi požeminio vandens mineralizacijos ir radionuklidų tirpumo kriterijai, kurie vertinami kokybiškai dėl tiesioginių tyrimų rezultatų nebuvimo. Jų reikšmingumo reitingas yra 0,05.

Trečiojoje (neapibrėžtumų) kriterijų grupėje pagal sukurtą metodiką yra 6 kriterijai (Nr. 16, 17, 18, 19, 20, 21). Reikšmingiausi šioje grupėje yra plyšių tankio ir tarpsluoksnių pačioje formacijoje skaičiaus kriterijai (Nr. 16 ir 17). Pagal 6 lentelėje pateiktą pavyzdį jiems suskaičiuotas 0,3 reikšmingumo reitingas (RR = 0,3). Reikšmingas šioje grupėje yra uolienos pleišėjimo dėl GA įrengimo tikimybės kriterijus. Jis vertinamas kokybiškai, o jo reikšmingumo reitingas yra 0,2. Kiti šios grupės kriterijai, oro temperatūros pokyčių tikimybės (RR= 0,05), kontinentinio apledėjimo tikimybės (RR= 0,05) ir formacijos uolienų silpnėjimo dėl GA įrengimo (RR= 0,1), pagal sukurtą metodiką laikomi mažiau reikšmingais formacijos tinkamumo vertinime.

Ketvirtajai grupei sukurtoje metodikoje yra priskirti 2 kriterijai. Savaiminis plyšių išnykimas yra laikomas 2,5 karto reikšmingesniu (RR= 0,7) už didesnės sorbcinės gebos mineralų susidarymą plyšiuose (RR= 0,3).

2.2.4. Geologinės formacijos tinkamumo giluminio radioaktyviųjų atliekų atlietkyno įrengimui skaičiavimo matrica

Geologinių formacijų tinkamumo vertinimui sukurtoje metodikoje yra sudaryta skaičiavimo matrica (7 lentelė). Joje kriterijų grupėms suteiktas svarbos rangas (SR), kriterijams grupėse nustatytas reikšmingumo reitingas (RR), o kriterijų reikšmėms - tinkamumo balai (TB). Geologinės formacijos tinkamumo GA įrengimui skaičius (FTS) pagal sukurtą metodiką apskaičiuojamas pagal formulę:

$$FTS = \sum_{i=1}^{n} \mathrm{SR}_i \times \mathrm{RR_i} \times \mathrm{TB_i}; \quad (1)$$

kur *i* yra kriterijaus numeris, *n* yra įvertintų kriterijų skaičius.

7 lentelė Geologinių formacijų tinkamumo GA įrengimui skaičiavimo matrica.

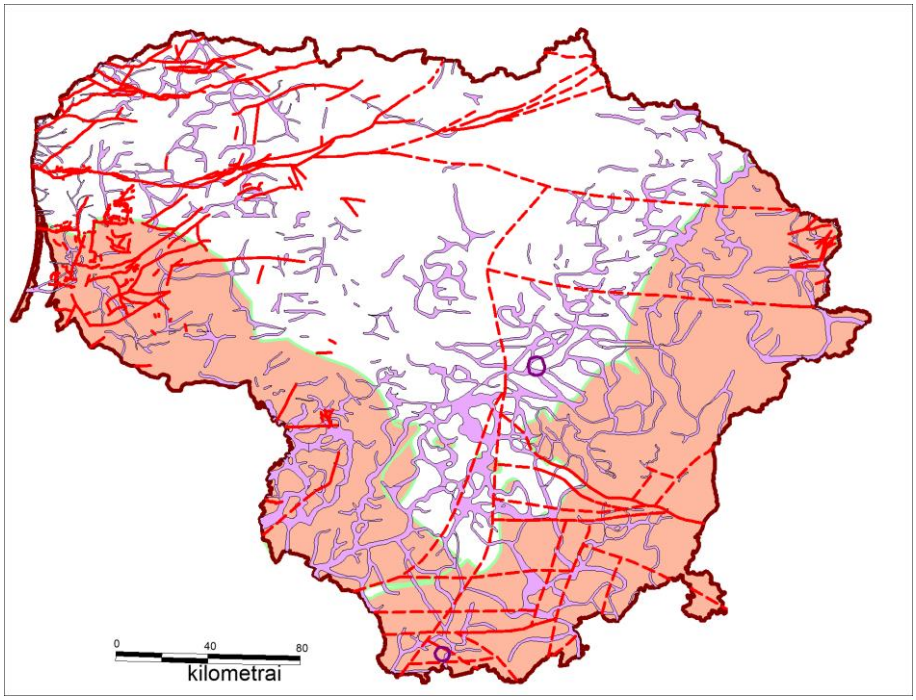
Geologiniai veiksniai	SR	Kriterijus ir jo Nr.	RR	Kriterijų reikšmės ir jų tinkamumo balai (TB)									
				interval as	TB	interval as	TB	interval as	TB	interval as	TB	interval as	TB
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Pakankamas formacijos tūris ir stiprumas	4	1. Gylis, m	0,2	<200	0	ND	1	> 700	2	200 - 500	3	500 - 700	5
		2. Formacijos storis, m	0,2	<50	0	ND	1	50 - 70	2	70 - 100	3	> 100	5
		3. Gamtinis tankis, Mg/m^3	0,2	<1,8	0	ND	1	> 2,5	2	1,8 – 2,2	3	2,2 – 2,5	5
		4. Paplitimo plotas, km^2	0,1	<10	0	ND	1	10 - 50	2	50 - 100	3	> 100,0	5
Stabilus tektoninis režimas	4	5. Vertikalių žemės plutos judesių greitis, mm/metai	0,1	> 5,0	0	ND	1	3,0 – 5,0	2	1,0 – 3,0	3	<1,0	5
		6. Atstumas nuo lūžio, km	0,05	0 – 5,0	0	ND	1	5,0 – 25,0	2	25,0 – 50,0	3	> 50,0	5
		7. Vulkanizmo tikimybė, kokybinis	0,05	didelė	0	ND	1	-	-	maža	3	labai maža	5
Naudingųjų iškasenų paplitimas	4	8. Atstumas nuo naudingųjų iškasenų, km	0,1	0 – 5,0	0	ND	1	5,0 – 25,0	2	25,0 – 50,0	3	> 50,0	5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Hidraulinis ryšys su ekosfera	3	9. Mažai laidžios uolienos formacijos dangoje, %.	0,25			0 - 10	1	ND	2	10 - 50	3	> 50	4
		10. Vandeningieji sluoksniai dangoje, skaičius	0,1			> 5	1	ND	2	5 - 3	3	<3	4
		11. Atstumas nuo paleojrėžio, km	0,1			0 - 10	1	ND	2	10 - 30	3	> 30,0	4
Požeminio vandens judėjimas	3	12. Formacijos filtracijos koeficientas, m/s	0,25			> 10^{-9}	1	ND	2	10^{-11} - 10^{-9}	3	<10^{-11}	4
	3	13. Vertikalios filtracijos kryptis, kokybinis	0,2			aukštyn	1	ND	2	žemyn	3	viename lygyje	4
Radionuklidų pernaša	3	14. Požeminio vandens mineralizacija, kokybinis	0,05			nepriso-tintas tirpalas	1	ND	2	-	-	priso-tintas tirpalas	4
		15. Radionuklidų tirpinimas, kokybinis	0,05			didelis	1	ND	2	-	-	mažas	4
Neapibrėžtumai dėl slūgsojimo sąlygų	2	16. Plyšių tankis, 1/m³	0,3			> 1	1	ND	2	-	-	< 1	3
		17. Tarpsluoksniai formacijoje, skaičius	0,3			> 1	1	ND	2			< 3	3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Neapibrėžtumai dėl klimato	2	18. Oro temperatūros pokyčių tikimybė, kokybinis	0,05			didelė	1	ND	2			maža	3
		19. Apledėjimo tikimybė, kokybinis	0,05			didelė	1	ND	2			maža	3
Pokyčiai dėl GA įtakos	2	20. Formacijos silpnėjimo galimybė, kokybinis	0,1			galimas	1	ND	2			Galimybės nėra	3
		21. Pleišėjimo tikimybė, kokybinis	0,2			didelė	1	ND	2			maža	3
Izoliacinių savybių pagerėjimas	1	22. Savaiminis plyšių išnykimas, kokybinis	0,7			Tikimybės nėra ar ND	1					Tikėtinas	2
		23. Didesnės sorbcinės gebos mineralų susidarymas, kokybinis	0,3			Nesusidaro ar ND	1					Susidaro	2

2.3. Lietuvos potencialių geologinių formacijų tinkamumas giluminio atliekyno įrengimui

Lietuvos teritorijoje slūgsančių potencialių geologinių formacijų tinkamumo vertinimui skaičiavimo matricos (7 lentelė) eilutės turi būti užpildytos tai formacijai būdingais tinkamumo balų (TB) duomenimis. Metodikoje nenagrinėjamos konkrečios potencialių geologinių formacijų slūgsojimo vietos, bet nustatoma, ar yra galimybė rasti tam tikrą formaciją kiekvieno kriterijaus apibūdinamose sąlygose. Atstumai iki tektoninių lūžių (Bitinas, Baliukevičius, 2019) ir paleojėžių (Čyžienė, Šliaupa, 1999) vertinami pagal specialiai šiam tikslui sudarytą schemą (10 pav.).



10 pav. Paleojėžių, tektoninių lūžių ir potencialių geologinių formacijų GA įrengimui išsidėstymo schema, kurioje rusva spalva žymimos potencialios geologinės formacijos, alyvine - paleojėžiai, o raudonomis ištisinėmis ir punktyrinėmis linijomis - tektoniniai lūžiai. Schemą sudarė autorė pagal literatūros šaltinių (Bitinas, Baliukevičius, 2019; Čyžienė, Šliaupa, 1999; Čyžienė ir kt., 2023) duomenis.

2.3.1. Formacijų tinkamumo vertinimas

Kristalinio pamato uolienų potenciali geologinė formacija (toliau - kristalinio pamato formacija)**.** Lietuvos teritorijoje kristalinio pamato kraigas slūgso nuo 300 m pietrytinėje dalyje iki 2300 m ir giliau vakarinėje dalyje (Satkūnas ir kt., 2005). Šių uolienų optimalus GA įrengimui slūgsojimo gylis nuo 500 iki 700 m yra tikėtinas gana dideliame plote. Todėl pirmojo kriterijaus (formacijos slūgsojimo gylis) tinkamumo balas nustatomas maksimalus (TB= 5).

Kristalinio pamato formacijos storis yra didžiausias palyginti su kitų geologinių formacijų storiu. Jis gali būti prilygintas kontinentinės platformos žemės plutos storiui (be nuosėdinės dangos) ir siekia dešimtis kilometrų. Kristalinio pamato geologinės formacijos antrojo kriterijaus (formacijos storis) tinkamumo balas nustatytas maksimalus (TB= 5).

Kristalinio pamato uolienos pasižymi palyginti dideliu gamtiniu tankiu. Įvairių tyrimų (Žvykas, ir kt., 1985, Vetrennikov ir kt., 1987) duomenimis šio parametro vertės kinta nuo 2,5 iki 3 Mg/m^3 ir daugiau, priklausomai nuo rūdinių mineralų kiekio. Pagal šiuos duomenis yra nustatytas kristalinio pamato geologinės formacijos trečiojo kriterijaus (gamtinis tankis) tinkamumo balas (TB= 2).

Kristalinio pamato geologinės formacijos paplitimo plotas ženkliai viršija 100 km^2, todėl ketvirtojo kriterijaus tinkamumo balas yra maksimalus (TB= 5).

Vertikalūs žemės plutos judesiai Lietuvos teritorijoje yra matuoti tik geodeziniame poligone rytiniame teritorijos pakraštyje (Marcinkevičius ir kt., 1995, Zakarevičius, 2003), kur jų amplitudė siekia 2 mm/metus. Tikėtina, kad ši vertė yra būdinga kristalinio pamato geologinei formacijai, kuri slūgso Lietuvos teritorijos rytuose. Todėl šios formacijos penktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 3 (TB= 3).

Lietuvos teritorijos tektoninis aktyvumas yra itin žemas. Aktyvių lūžių arti žemės paviršiaus nėra. Tektoniniai lūžiai, kertantys įvairaus amžiaus uolienas Lietuvos teritorijoje buvo nustatomi įvairiais metodais. Daugelio autorių sudaryti tektoniniai žemėlapiai yra gana skirtingi. Sukurtos metodikos šeštojo kriterijaus analizei buvo parinkta tektoninių lūžių, nustatytų gręžiniais ir seisminiais tyrimais, schema (10 pav.). Pagal šią schemą didžiausias atstumas iki tektoninio lūžio kristalinio pamato formacijos paplitimo plote vidutiniškai yra apie 20 km, todėl šeštojo kriterijaus tinkamumo balas yra 2 (TB= 2).

Vulkanizmo tikimybė visoje Lietuvos teritorijoje yra labai maža. Šis kriterijus nagrinėjamas todėl, kad TATENA rekomendacijose ir įvairių šalių atliktų tyrimų rezultatuose tai yra vienas iš GA saugos vertinimo kriterijų. Septintojo kriterijaus tinkamumo balas kristalinio pamato formacijai yra 5 (TB= 5).

Šiuo metu yra aptiktas tik vienas (Varėnos geležies rūda) naudingųjų iškasenų telkinys, galintis turėti įtakos GA įrengimui kristaliniame pamate. Šio telkinio plotas palyginti su formacijos paplitimo plotu yra nykstamai mažas, todėl aštuntojo kriterijaus (Atstumas nuo naudingųjų iškasenų) tinkamumo balas nustatytas maksimalus (TB= 5).

Mažai laidžių uolienų kiekis kristalinio pamato formacijos dangoje yra gana įvairus. Paplitimo ploto dalyje, kur yra atliktas giluminis geologinis kartografavimas M 1: 200 000 (Žvykas, 1993) mažai laidžios uolienos sudaro apie 40%, kitur rytinėje Lietuvos dalyje didelę geologinio pjūvio dalį sudaro tarpmoreniniai vandeningieji sluoksniai, viršutinio-vidurinio devono Šventosios - Upninkų vandeningasis sluoksnis, silūro ir ordoviko karbonatinės uolienos, todėl devintojo kriterijaus tinkamumo balas kristalinio pamato formacijai yra 3 (TB= 3).

Virš kristalinio pamato uolienų slūgsančių vandeningųjų sluoksnių skaičius yra didžiausias palyginti su kitomis Lietuvos teritorijos geologinėmis formacijomis. Pavyzdžiui, rytinėje Lietuvos dalyje, IAE apylinkėse, šis skaičius yra 6, neskaičiuojant atskirų tarpmoreninių kvartero vandeningųjų sluoksnių (Kanopienė, Gadeikis, 2023). Todėl dešimtojo kriterijaus tinkamumo balas kristalinio pamato formacijai yra nustatomas 1 (TB= 1).

Paleoįrėžiai kristalinio pamato paviršiaus Lietuvos teritorijoje nesiekia, tačiau dėl gana tankaus jų tinklo nuosėdinė danga yra labiau laidi skysčiams ir dujoms. Didžiausias atstumas iki paleoįrėžio kristalinio pamato formacijos paplitimo plote yra apie 11 - 13 km (11 pav.), todėl vienuoliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 3 (TB= 3).

Kristalinio pamato uolienose (išskyrus dūlėjimo plutą) drėgmės migracija vyksta plyšiais. Nei plyšių, nei neplyšiuotų kristalinių uolienų filtracijos koeficientas Lietuvoje nėra tirtas. Dvyliktojo kriterijaus tinkamumo balas KP formacijai yra 2 (TB= 2).

Didžioji potencialios kristalinio pamato geologinės formacijos dalis yra paplitusi regioninėje požeminio vandens mitybos srityje, kur pertekėjimas vyksta žemyn, tačiau per neplyšiuotas kristalines uolienas kryptingas

pertekėjimas nevyksta, todėl tryliktojo kriterijaus tinkamumo balas nustatomas 4 (TB= 4).

Viršutinėje kristalinio pamato uolienų dalyje yra susiformavusi plyšiuota vandeninga dūlėjimo pluta. Šios kristalinių uolienų dalies požeminio vandens mineralizacija yra labai kaiti ir priklauso nuo slūgsojimo gylio. Požeminio vandens mineralizacija kristaliniame pamate vietomis tesiekia 200 mg/l, (Žvykas ir kt., 1985) todėl keturioliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 1 (TB= 1).

Radionuklidų tirpinimas kristalinio pamato vandenyje Lietuvoje nėra tirtas, todėl penkioliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 2 (TB= 2).

Vertinant kristalinio pamato potencialios formacijos tinkamumą yra priimama prielaida, kad formacija giliau dūlėjimo plutos gamtinėse sąlygose yra neplyšiuota, todėl šešioliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 3 (TB= 3).

Dažniausiai kristalinio pamato uolienoms yra būdinga blokinė struktūra, o skirtingos petrografinės sudėties uolienos sluoksnių nesudaro, tačiau vietomis gali pasitaikyti intruzijų ar metamorfizuotų uolienų intarpų, kurių sluoksniuotumas nėra ištirtas. Todėl septynioliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 2 (TB= 2).

Oro temperatūros pokyčiai žemės paviršiuje gali įtakoti požeminio vandens režimą visose geologinėse formacijose, tačiau šie neapibrėžtumai Lietuvoje nėra tirti. Todėl aštuonioliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 2 (TB= 2).

Apledėjimo tikimybė GA sistemos prognozių laikotarpiu (10 - 100 tūkst. metų) yra didelė, tačiau ledynų įtaka kristalinio pamato uolienoms dėl didelio slūgsojimo gylio, tikėtina, bus minimali. Todėl devynioliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 3 (TB= 3).

Kristalinių uolienų silpnėjimas dėl GA įrengimo, remiantis pasauline tyrimų praktika nėra nustatytas, todėl dvidešimtojo kriterijaus tinkamumo balas yra 3 (TB= 3).

Kristalinės uolienos yra trapios, o GA įrengimas jose įtakoja slėgį ir įtempius. Aplink įrengiamą GA formuojasi plyšiuota KPZ, todėl dvidešimt pirmojo kriterijaus tinkamumo balas yra 1 (TB= 1).

Savaiminis plyšių išnykimas kristalinėse uolienose nevyksta dėl negrįžtamų trapių deformacijų, todėl dvidešimt antrojo kriterijaus tinkamumo balas yra 1 (TB= 1).

Kristalinių uolienų plyšiuose besiformuojančių mineralų sorbcinės savybės Lietuvoje nėra tirtos, todėl dvidešimt trečiojo kriterijaus tinkamumo balas yra 1 (TB= 1).

Atlikus skaičiavimus pagal (1) formulę kristalinio pamato potencialios formacijos tinkamumo skaičius gaunamas 29,5 (**FTS=29,5**).

Apatinio kambro Baltijos serijos molingų uolienų potenciali geologinė formacija (toliau - kambro formacija). Kambro formacija slūgso nuo 250 m pietrytinėje Lietuvos dalyje iki 700 - 800 m gylyje rytinėje - šiaurės rytinėje Lietuvos dalyse (Čyžienė et al., 2005). Šių uolienų optimalus GA įrengimui slūgsojimo gylis nuo 500 iki 700 m yra tikėtinas gana dideliame plote. Todėl pirmojo kriterijaus (formacijos slūgsojimo gylis) tinkamumo balas nustatomas maksimalus (TB= 5).

Kambro formacijos storis kinta nuo 50 iki 80 m, kai kur siekia 100 m (Jankauskas, 2002; Čyžienė et al., 2005). Kambro formacijos antrojo kriterijaus (formacijos storis) tinkamumo balas yra 3 (TB= 3).

Gamtinis tankis kambro formacijos uolienoms Lietuvoje nėra nustatytas tiesioginiais metodais. Pagal geofizinių tyrimų gręžiniuose duomenis šios formacijos gamtinis tankis gali siekti 2,1 - 2,25 Mg/m³. Kambro formacijos trečiojo kriterijaus tinkamumo balas yra 3 (TB= 3).

Kambro formacijos paplitimo plotas ženkliai viršija 100 km², todėl ketvirtojo kriterijaus tinkamumo balas yra maksimalus (TB= 5).

Kaip minėta, vertikalūs žemės plutos judesiai Lietuvos teritorijoje yra matuoti tik geodeziniame poligone rytiniame teritorijos pakraštyje (Marcinkevičius ir kt., 1995, Zakarevičius, 2003), kur jų amplitudė siekia 2 mm/metus. Tikėtina, kad ši vertė yra būdinga ir kambro formacijai, kuri slūgso Lietuvos teritorijos rytinėje dalyje. Todėl šios formacijos penktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 3 (TB= 3).

Didžiausias atstumas iki tektoninio lūžio kambro formacijos paplitimo plote vidutiniškai yra apie 30 km (10 pav.), todėl šeštojo kriterijaus tinkamumo balas yra 3 (TB= 3).

Kaip minėta, vulkanizmo tikimybė visoje Lietuvos teritorijoje yra labai maža. Septintojo kriterijaus tinkamumo balas kambro formacijai yra 5 (TB= 5).

Kambro formacijoje naudingųjų iškasenų žvalgyba ilgalaikėje perspektyvoje yra mažai tikėtina. Giliau slūgsančių išteklių šiuo metu

neaptikta, todėl aštuntojo kriterijaus (atstumas nuo naudingųjų iškasenų) tinkamumo balas nustatytas maksimalus (TB= 5).

Mažai laidžių uolienų kiekis kambro formacijos dangoje yra gana įvairus. Paplitimo ploto dalyje, kur yra atliktas giluminis geologinis kartografavimas m 1: 200 000 (Žvykas, 1993) mažai laidžios uolienos sudaro apie 40%, kitur rytinėje Lietuvos dalyje didelę geologinio pjūvio dalį sudaro tarpmoreniniai vandeningieji sluoksniai, viršutinio -vidurinio devono Šventosios - Upninkų vandeningasis sluoksnis, silūro ir ordoviko karbonatinės uolienos, todėl devintojo kriterijaus tinkamumo balas kambro formacijai yra 3 (TB= 3).

Rytinėje Lietuvos dalyje, virš kambro formacijos slūgso 4 vandeningieji sluoksniai, neskaičiuojant atskirų tarpmoreninių kvartero vandeningųjų sluoksnių (Kanopienė, Gadeikis, 2023). Todėl dešimtojo kriterijaus tinkamumo balas kambro formacijai yra nustatomas 3 (TB= 3).

Paleoįrėžiai kambro formacijos paviršiaus Lietuvos teritorijoje nesiekia, tačiau dėl gana tankaus jų tinklo nuosėdinė danga yra labiau laidi skysčiams ir dujoms. Didžiausias atstumas iki paleoįrėžio kambro formacijos paplitimo plote yra apie 11 - 13 km (11 pav.), todėl vienuoliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 3 (TB= 3).

Kambro formacijos uolienų filtracijos koeficientas buvo nustatytas Belgijos SCK-CEN centre trims bandiniams iš Šaškai-2 struktūrinio gręžinio kerno. Nustatyta vidutinė vertė yra 1,5 x 10^{-11} m/s. Vidutinis apskaičiuotas pagal regioninio požeminio vandens balanso duomenis (Juodkazis, Paltanavičius, 1979) kambro formacijos uolienų filtracijos koeficientas yra 4,3 x 10^{-11} m/s. Todėl dvyliktojo kriterijaus tinkamumo balas kambro formacijai yra nustatomas 3 (TB= 3).

Didžioji kambro formacijos dalis yra paplitusi regioninėje požeminio vandens mitybos srityje, kur pertekėjimas vyksta žemyn. Rytinėje Lietuvos dalyje atliktų tyrimų duomenimis (Marcinkevičius ir kt., 1995) vidutinis pjezometrinis lygis ordoviko - kambro ir kambro - vendo vandeninguosiuose sluoksniuose yra panašus. Todėl tryliktojo kriterijaus tinkamumo balas kambro formacijai nustatomas 4 (TB= 4).

Lietuvos kambro formacijos porų tirpalų cheminė sudėtis nėra tirta. Su formacija besiribojančių vandeningųjų sluoksnių požeminio vandens mineralizacija yra itin didelė ir siekia 157 000 mg/l (Kadūnas ir kt., 2018). Todėl keturioliktojo kriterijaus tinkamumo balas kambro formacijai nustatomas 4 (TB= 4).

Radionuklidų tirpinimas kambro formacijos vandenyje (porų tirpale) Lietuvoje nėra tirtas, todėl penkioliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 2 (TB= 2).

Plyšių tankis kambro formacijoje nėra tirtas, todėl šešioliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 2 (TB= 2).

Smėlingų tarpsluoksnių kambro formacijoje aptinkama gana daug (Čyžienė et al., 2005), todėl septynioliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 1 (TB= 1).

Oro temperatūros pokyčiai žemės paviršiuje gali įtakoti požeminio vandens režimą visose geologinėse formacijose, tačiau šie neapibrėžtumai Lietuvoje nėra tirti. Todėl aštuonioliktojo kriterijaus tinkamumo balas kambro formacijai yra 2 (TB= 2).

Apledėjimo tikimybė GA sistemos prognozių laikotarpiu (10 - 100 tūkst. metų) yra didelė, tačiau ledynų įtaka kambro formacijos uolienoms dėl didelio slūgsojimo gylio, tikėtina, bus minimali. Todėl devynioliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 3 (TB= 3).

Molingų uolienų silpnėjimas dėl GA įrengimo, remiantis pasauline tyrimų praktika nėra nustatytas, todėl dvidešimtojo kriterijaus tinkamumo balas kambro formacijai yra 3 (TB= 3).

Pleišėjimo tikimybė dėl GA įrengimo molingose uolienose yra maža dėl plastiško deformacijų pobūdžio. Todėl dvidešimt pirmojo kriterijaus tinkamumo balas kambro formacijai yra 3 (TB= 3).

Savaiminis plyšių išnykimas molingose uolienose yra tikėtinas, todėl dvidešimt antrojo kriterijaus tinkamumo balas kambro formacijai yra 2 (TB= 2).

Plyšiuose besiformuojančių mineralų sorbcinės savybės Lietuvoje nėra tirtos, todėl dvidešimt trečiojo kriterijaus tinkamumo balas yra 1 (TB= 1).

Atlikus skaičiavimus pagal (1) formulę kambro formacijos tinkamumo skaičius gaunamas 30,4 (**FTS=30,4**).

Apatinio triaso molingų uolienų potenciali geologinė formacija (toliau - triaso formacija). Triaso formacija slūgso pietvakarinėje Lietuvos dalyje ir yra išskiriama 200 - 376 m gylyje. Triaso uolienų, vietomis net molingiausios Palangos svitos kraigas slūgso ir sekliau, tačiau, kaip minėta

potencialiai tinkamos GA įrengimui geologinės formacijos buvo išskirtos pagal ne mažesnį nei 200 m slūgsojimo gylį. Todėl nustatytas pirmojo kriterijaus (slūgsojimo gylis) tinkamumo balas triaso formacijai yra 3 (TB= 3).

Triaso formacija pasižymi dideliu storiu. Formacijos storis kinta nuo 150 iki 250 m (Satkūnas ir kt., 2005), todėl antrojo kriterijaus tinkamumo balas triaso formacijai nustatomas maksimalus (TB= 5).

Triaso formacijos gamtinis tankis yra laboratoriniais tyrimais nustatytas gręžinyje Pagiriai-6 anhidrito telkinio žvalgybos metu ir kinta nuo 2,23 iki 2,26 Mg/m³ (Mikšys, 2004). Panašios vertės gaunamos ir skaičiuojant šį parametrą iš gręžinių diagrafijos kreivių, todėl trečiojo kriterijaus tinkamumo balas triaso formacijai yra 5 (TB= 5).

Triaso formacijos paplitimo plotas ženkliai viršija 100 km², todėl ketvirtojo kriterijaus tinkamumo balas yra maksimalus (TB= 5).

Kaip minėta, vertikalūs (neotektoniniai) žemės plutos judesiai Lietuvos teritorijoje yra matuoti tik geodeziniame poligone rytiniame teritorijos pakraštyje, o triaso formacija paplitusi pietvakarių Lietuvoje, kur šių judesių greitis buvo tik skaičiuotas pagal topografinių žemėlapių duomenis (Zakarevičius, 2003). Todėl penktojo kriterijaus tinkamumo balas triaso formacijai yra 1 (TB= 1).

Didžiausias atstumas iki tektoninio lūžio triaso formacijos paplitimo plote vidutiniškai yra apie 24 km (10 pav.), todėl šeštojo kriterijaus tinkamumo balas yra 2 (TB= 2).

Kaip minėta, vulkanizmo tikimybė visoje Lietuvos teritorijoje yra labai maža. Septintojo kriterijaus tinkamumo balas triaso formacijai yra 5 (TB= 5).

Triaso formacijos technogeninis pažeidimas yra tikėtinas dėl anhidrito, akmens druskos (vakarinė paplitimo ploto dalis) ar gėlo požeminio vandens (rytinė paplitimo ploto dalis) išteklių, slūgsančių po triaso formacija, paieškos ir naudojimo. Tačiau dėl didelio triaso formacijos paplitimo ploto, palyginti su kuriuo druskos ir anhidrito telkiniai yra labai maži, ir atsižvelgiant į tai, kad vandeningos permo uolienos aptinkamos tik pačiame rytiniame triaso formacijos paplitimo ploto pakraštyje, didžiausias atstumas iki naudingųjų iškasenų yra daugiau nei 50 km (10 pav.). Todėl aštuntojo kriterijaus tinkamumo balas nustatytas maksimalus (TB= 5).

Triaso formaciją dengiančių uolienų pjūvyje mažai laidūs sluoksniai sudaro apie 45 % viso dangos storio (Čyžienė ir kt., 2023). Todėl devintojo kriterijaus tinkamumo balas triaso formacijai yra 3 (TB= 3).

Triaso formaciją dengiančių uolienų pjūvyje yra 3 vandeningieji sluoksniai, atskirai neskaičiuojant kvartero tarpmoreninių vandeningųjų sluoksnių. Todėl dešimtojo kriterijaus tinkamumo balas triaso formacijai yra 3 (TB= 3).

Giliausi paleoįrėžiai Lietuvos teritorijoje yra įsirėžę į 200 - 230 m gylį. Kai kur jie siekia ir triaso uolienas. Didžiausias atstumas iki paleoįrėžio triaso formacijos paplitimo plote yra apie 10 km (10 pav.), todėl vienuoliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 1 (TB= 1).

Triaso formacijos uolienų filtracijos koeficientas buvo nustatytas pertekėjimo metodu (Paltanavičius, 1974) ir laboratoriniais tyrimais (Kanopienė, 2015). Abiem atvejais tyrimų rezultatai yra panašūs. Triaso formacijos filtracijos koeficientas tesiekia 10^{-12} m/s, todėl dvyliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 4 (TB= 4).

Vertinant pjezometrinio požeminio vandens lygio skirtumus tarp aukščiau ir žemiau triaso formacijos slūgsančių vandeningųjų sluoksnių, vertikali pertekėjimo kryptis yra žemyn, todėl tryliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 3 (TB= 3).

Triaso formacijos porų tirpalų mineralizacija nėra tirta. Vandeningųjų sluoksnių virš ir žemiau triaso formacijos mineralizacija labai skirtinga vakarinėje ir pietinėje formacijos paplitimo ploto dalyje. Aukščiau triaso formacijos slūgso gėlo požeminio vandens vandeningieji sluoksniai, o žemiau - mineralizuoto arba gėlo (rytinė dalis) ir sūrymų (vakarinė dalis). Triaso formacijos keturioliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 2 (TB= 2).

Radionuklidų tirpinimas triaso formacijos vandenyje (porų tirpale) Lietuvoje nėra tirtas, todėl penkioliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 2 (TB= 2).

Pagal išlikusio anksčiau gręžtų gręžinių kerno analizės duomenis plyšių triaso formacijos uolienose pasitaiko (Kanopienė ir kt., 2005). Tikslesnis jų skaičius uolienos tūryje nėra nustatytas, todėl vertinant triaso formacijos tinkamumą kriterijaus parametro vertė yra > 1, o šešioliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 1 (TB= 1).

Dėl didelio triaso formacijos storio yra galimybė išskirti molingą formacijos dalį be tapsluoksnių, todėl septynioliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 3 (TB= 3).

Oro temperatūros pokyčiai žemės paviršiuje gali įtakoti požeminio vandens režimą visose geologinėse formacijose, tačiau šie neapibrėžtumai Lietuvoje nėra tirti. Todėl aštuonioliktojo kriterijaus tinkamumo balas triaso formacijai yra 2 (TB= 2).

Apledėjimo tikimybė GA sistemos prognozių laikotarpiu (10 - 100 tūkst. metų) yra didelė. Ankstesnių kontinentinių apledėjimų tyrimų rezultatai leidžia teigti, kad ledynų įtaka (egzaracija, tirpsmo vandens poveikis) triaso formacijai yra galima. Ateityje gali formuotis nauji paleoįrėžiai, paviršiaus nuogulos gali būti perklostytos, gali pasikeisti šių nuogulų savybės. Todėl devynioliktojo kriterijaus tinkamumo balas yra 1 (TB= 1).

Molingų uolienų silpnėjimas dėl GA įrengimo, remiantis pasauline tyrimų praktika nėra nustatytas, todėl dvidešimtojo kriterijaus tinkamumo balas triaso formacijai yra 3 (TB= 3).

Pleišėjimo tikimybė dėl GA įrengimo molingose uolienose yra maža dėl plastiško deformacijų pobūdžio. Todėl dvidešimt pirmojo kriterijaus tinkamumo balas triaso formacijai yra 3 (TB= 3).

Savaiminis plyšių išnykimas molingose uolienose yra tikėtinas. Be to, triaso formacijos uolienų mineraloginės sudėties tyrimų rezultatai rodo, kad nemažą dalį molio mineralų uolienose sudaro montmorilonitas, kas lemia ne tik plyšių išnykimo galimybę, bet ir uolienos brinklumą. Todėl dvidešimt antrojo kriterijaus tinkamumo balas triaso formacijai yra 2 (TB= 2).

Plyšiuose besiformuojančių mineralų sorbcinės savybės Lietuvoje nėra tirtos, todėl dvidešimt trečiojo kriterijaus tinkamumo balas yra 1 (TB= 1).

Atlikus skaičiavimus pagal (1) formulę apatinio triaso formacijos tinkamumo skaičius gaunamas 31,43 (**FTS=31,43**).

2.3.2. Formacijų tinkamumo palyginimas

Geologinės formacijos ir vietos GA parinkimo procesuose dažnai yra svarbu palyginti keletą formacijų. Skirtingos sudėties ir savybių geologinės formacijos tarpusavyje negali būti palygintos, nes nėra universalių tam skirtų kriterijų. Tačiau lengvai gali būti palygintas geologinių formacijų tinkamumas kuriam nors tikslui. Panaudojant šiame darbe sukurtą metodiką gali būti

palygintas geologinių formacijų tinkamumas GA įrengimui ir pagal šio palyginimo rezultatus parinkta geologinės formacija, pasižyminti didžiausiu tinkamumu. Pagal metodiką atliktų skaičiavimų rezultatai rodo (8 lentelė), kad didžiausiu tinkamumu GA įrengimui Lietuvos teritorijoje pasižymi apatinio Triaso potenciali formacija (**FTS=31,43**), mažesnis yra kambro potencialios formacijos tinkamumas (**FTS=30,4**), o kristalinio pamato potencialios formacijos tinkamumas yra mažiausias (**FTS=29,5**). Artimos FTS reikšmės rodo, kad jau išskiriant potencialias geologines formacijas GA įrengimui Lietuvoje buvo įvertinti svarbiausi jų tinkamumo kriterijai.

8 lentelė. Potencialių formacijų kriterijų tinkamumo balai.

SR	Kriterijus ir jo Nr.	RR	Potencialių formacijų TB		
			KP	$€_1$	T_1
4	1. Gylis, m	0,2	5	5	3
	2. Formacijos storis, m	0,2	5	3	5
	3. Gamtinis tankis, Mg/m^3	0,2	2	3	5
	4. Paplitimo plotas, km^2	0,1	5	5	5
4	5. Vertikalių žemės plutos judesių greitis, mm/metai	0,1	3	3	1
	6. Atstumas nuo lūžio, km	0,05	2	3	2
	7. Vulkanizmo tikimybė, kokybinis	0,05	5	5	5
4	8. Atstumas nuo naudingųjų iškasenų, km	0,1	5	5	5
3	9. Mažai laidžios uolienos formacijos dangoje, %.	0,25	3	3	3
	10. Vandeningieji sluoksniai dangoje, skaičius	0,1	1	3	3
	11. Atstumas nuo paleojrėžio, km	0,1	3	3	1
3	12. Formacijos filtracijos koeficientas, m/s	0,25	2	3	4
3	13. Vertikalios filtracijos kryptis, kokybinis	0,2	4	4	3
3	14. Požeminio vandens mineralizacija, kokybinis	0,05	1	4	2
	15. Radionuklidų tirpinimas, kokybinis	0,05	2	2	2
2	16. Plyšių tankis, $1/m^3$	0,3	3	2	1
	17. Tarpsluoksniai formacijoje, skaičius	0,3	2	1	3
2	18. Oro temperatūros pokyčių tikimybė, kokybinis	0,05	2	2	2
	19. Apledėjimo tikimybė, kokybinis	0,05	3	3	1
2	20. Formacijos silpnėjimo galimybė, kokybinis	0,1	3	3	3
	21. Pleišėjimo tikimybė, kokybinis	0,2	1	3	3
1	22. Savaiminis plyšių išnykimas, kokybinis	0,7	1	2	2
	23. Didesnės sorbcinės gebos mineralų susidarymas, kokybinis	0,3	1	1	1
Formacijos tinkamumo skaičius (FTS)			**29,5**	**30,4**	**31,43**

3. SAVYBIŲ PROCESŲ IR REIŠKINIŲ SISTEMINIMAS, ANALIZĖ IR TYRIMAS

3.1. Savybių, procesų ir reiškinių sąvadai

Geologiniai ir kitų sričių tyrimai, skirti GA įrengimui, įvairiose šalyse buvo vykdomi skirtingais laikotarpiais, skirtinga apimtimi ir pagal įvairias metodikas. Šių tyrimų apimtis ir metodai dažniausiai priklausė nuo tam tikroje šalyje priimtos atliekų galutinio saugojimo koncepcijos. Per pastaruosius 50 metų pasaulyje buvo sukauptas didelis kiekis atskirų tyrimų rezultatų, tačiau šie rezultatai nebuvo susisteminti, nebuvo sukurta vieninga tyrimų metodika ar tipinė programa. Dvidešimtojo amžiaus pačioje pabaigoje, daugeliui šalių priėmus sprendimą įrengti GA ilgaamžėms ir didelio aktyvumo RA, iškilo būtinybė išanalizuoti ir apibendrinti įvairiose šalyse šiam tikslui atliktų tyrimų rezultatus.

Kaip jau minėta, geologinė formacija yra natūralus radionuklidų sklaidos barjeras, užtikrinantis ilgalaikę GA saugą. Kiekviena geologinė formacija pasižymi tam tikromis savybėmis, joje ir geologinėje aplinkoje vyksta gamtiniai ir žmogaus veiklos sukelti procesai, lemiantys įvairius reiškinius geologinėje formacijoje ar jos aplinkoje.

Terminai „**savybės įvykiai ir procesai**“, anglų kalba *Features, events and processes (FEPs)* yra nusistovėję ir suprantami pasaulio mokslininkams, tiriantiems GA įrengimo galimybes. Lietuvių kalba šiuos terminus galima būtų įvardinti kaip „savybes, procesus ir reiškinius“ ir vartoti trumpinį SPR. Šiame darbe nagrinėjamos savybės, procesai ar reiškiniai yra įvardijami trumpiniu **SPR**.

Savybės- uolienų, formacijos, ar geologinės aplinkos savybės, lemiančios GA saugą.

Reiškiniai- gamtiniai veiksniai, įtakojantys GA saugą ir būdingi geologinei aplinkai dabartyje (iki 100 metų laikotarpiu).

Procesai- procesai, lemiantys ilgalaikę GA saugą ir vykstantys geologinėje aplinkoje ilgą (100 000 metų ar ilgesnis) laiką.

SPR sisteminimo tikslas yra galimų GA sistemos elgsenos scenarijų nustatymas. Šie scenarijai yra GA ilgalaikės saugos vertinimo pagrindas. Ne tik ilgalaikė sauga, bet ir GA įrengimo galimybės yra vertinamos analizuojant

tam tikrus hipotetinius scenarijus. Be to SPR sisteminimas yra naudingas pagrindžiant formacijų tinkamumo vertinimo kriterijus bei nustatant tyrimų ir duomenų trūkumą.

Pirmieji SPR katalogai ar sąrašai būdavo sudaromi apibendrinant atskirų šalių ar tyrimų projektų, skirtų GA įrengimui, duomenis ir rezultatus. Juose buvo nagrinėjami SPR, būdingi skirtingoms geologinėms formacijoms, skirtingoms GA koncepcijoms ar tik tam tikroms parinktoms planuojamų GA vietoms.

Pasaulinis molingų uolienų SPR katalogas (Mazurek et al., 2003) buvo sudarytas iš įvairių šalių gautų užpildytų anketų duomenų pagrindu. Jame apibendrinami tyrimai, atlikti Prancūzijoje, Ispanijoje, Šveicarijoje, Belgijoje, Vengrijoje, Japonijoje ir JAV. Išnagrinėjus šių šalių patirtį, buvo sudarytas 526 SPR sąrašas. Vėliau toks sąrašas buvo sutrumpintas iki 290 SPR, išbraukiant su katalogo tikslu nesutampančius, ilgesnį nei 1 mln. metų apimančius, per daug detalius ar per daug bendrus, su molingomis uolienomis mažai susijusius ir nuo požeminės laboratorijos konstrukcijos priklausančius duomenis. Šiame likusiame sąraše duomenys priklausė nuo projektų stadijos, tyrimų dokumentų kokybės. Toks sąrašas nebuvo panaudotinas tolesnių tyrimų planavimui ir neatspindėjo atskirų SPR sąsajų ir ištirtumo. Siekiant sudaryti SPR katalogą, kuris galėtų būti panaudotas tiek SPR ištirtumo analizei, tiek tyrimų planavimui įvairiose šalyse bendras SPR sąrašas buvo struktūrizuotas, atsižvelgiant į SPR aktualumą GA saugos analizei, priklausomybę konkrečioms tyrimų, požeminių laboratorijų ar GA vietoms bei ištyrimo detalumą.

Kiekvienas SPR buvo apibūdintas pagal vieningą anketą, kurioje numatyta pateikti tokią informaciją: SPR pavadinimas; SPR apibrėžimas ; SPR padėtis klasifikacijoje; SPR aktualumas įvairioms molingoms uolienoms; vietovei būdinga tyrimų informacija (iš *in situ* tyrimų, iš apibendrinamųjų lauko tyrimų, iš laboratorinių tyrimų, iš modeliavimo rezultatų, mastelio aspektai); SPR supratimo lygis (mokslinė perspektyva ar GA elgsenos analizės perspektyva); praktinis SPR panaudojimas saugos analizėje; sąsajos su kitais SPR; sintezės ar pažangos analizės buvimas (būdinga vietovei, apibendrinimai susiję su numatomomis saugoti atliekomis, literatūriniai leidiniai); planuojami tolesni SPR tyrimai (laiko, laboratoriniai, modeliavimas); bendras SPR vertinimas; pastabos; informacijos šaltiniai.

Surinkus informaciją iš užpildytų anketų, buvo pastebėta, kad reikalingas SPR sąrašo supaprastinimas. Buvo atsisakyta duomenų apie mažai apibūdintus SPR, nustatyta, kad kai kurie procesai apima keletą anksčiau

įvardintų SPR. Likusieji 59 SPR buvo suskirstyti pagal hierarchiją ir pasireiškimo aplinką. Tokiu būdu buvo sudarytas galutinis SPR sąrašas (9 lentelė).

9 lentelė. Struktūrizuotas SPR sąrašas molingoms uolienoms (pagal Mazurek et al.,2003).

Eil. Nr.	Hierarchinis SPR Nr.	Struktūrizuota SPR klasifikacija	Susiję SPR	Svarbos grupė
1	2	3	4	5
	A	Nesuardyta (nepažeista) sistema		
	A1	Pernašos (sklaidos) procesai		
1	A1.1	Advekcija/dispersija		1
2	A1.1.1	Formacijos ir aplinkinių sluoksnių geometrija, migracijos kelių ilgis		1
3	A1.1.2	Migracijos keliai, įskaitant uolienų heterogeniškumą ir sandarą		1
4	A1.1.3	Nenustatytos (neištirtos) geologinės savybės		1
5	A1.1.4	Talpinančios uolienos hidraulinis potencialas, hidraulinis gradientas, įskaitant ribines sąlygas		1
6	A1.1.5	Talpinančios uolienos filtracinės savybės		1
7	A1.1.6	Talpinančią uolieną dengiantys ir aslojantys sluoksniai, regioninės hidrogeologinės sąlygos		1
	A1.2	Difuzija	A2.1	
8	A1.2.1	Difuziškumas	A2.1.1	1
9	A1.2.2	Atviras matricos poringumas	A2.1.2	1
10	A1.2.3	Jonų išsiskyrimas	A2.1.4	1
11	A1.2.4	Paviršiaus difuzija	A2.1.5	5
12	A1.3	Koloidų susidarymas ir sklaida		4
	A2	Sulėtinimo procesai		
	A2.1	Matricos difuzija	A1.2	
8	A2.1.1	Difuziškumas	A1.2.1	1
9	A2.1.2	Atviras matricos poringumas	A1.2.2	1
13	A2.1.3	Filtracijos paviršius ir matricos atvirumas		4

1	2	3	4	5
10	A2.1.4	Jonų išsiskyrimas	A1.2.3	1
11	A2.1.5	Paviršiaus difuzija	A1.2.4	5
	A2.2	Sorbcija (bendrąja prasme)		
14	A2.2.1	Uolienų litologija, mineralogija ir plyšių užpildai		1
15	A2.2.2	Gamtinės organinės medžiagos ir kompleksacija		2
16	A2.2.3	Mineralų paviršiaus plotas		1
17	A2.2.4	Porų ir plyšių tirpalų sudėtis		1
18	A2.2.5	Kietosios fazės tirpimas ir nusėdimas		2
19	A2.2.6	Kietieji tirpalai/ bendra kristalizacija		2
20	A2.2.7	Jonų mainai		1
21	A2.2.8	Paviršiaus kompleksacija		2
22	A2.2.9	Termodinaminio ir kinetinio modeliavimo duomenys		2
	A3	Sistemos supratimas ir nepriklausomi metodai/ priemonės prognostinių modelių sudarymui		
23	A3.1	Uolienų paleohidrogeologija	C1.1.1	1
24	A3.2	Porų fliuidų (vandens ir dujų) cheminės sudėties ir mineralų raida talpinančioje uolienoje ir jos aplinkoje	C1.1.2	1
25	A3.3	Vandens amžius talpinančioje uolienoje		1
	B	GA įrengimo sukelti sistemos pokyčiai (sutrikdymai)		
	B1	Cheminiai pokyčiai		
26	B1.1	Talpinančios uolienos oksidacija		1
27	B1.1.1	Talpinančios uolienos oksidacinis-redukcinis buferingumas		2
28	B1.2	GA sistemos poveikis uolienos porų tirpalų cheminei sudėčiai		2
29	B1.2.1	Itin šarminių fliuidų ir talpinančios uolienos sąveika		1
30	B1.2.2	Organinės medžiagos iš GA poveikis medžiagų sklaidai uolienoje		2

1	2	3	4	5
	B2	Temperatūriniai (terminiai) pokyčiai		
31	B2.1	Temperatūrinis poveikis mineralų stabilumui ir porų tirpalų sudėčiai		4
32	B2.2	Uolienų terminės savybės		1
33	B2.3	Talpinančios uolienos konsolidacija dėl temperatūros poveikio		5
	B3	Geomechaniniai pokyčiai		
34	B3.1	Geomechaninis stabilumas		1
35	B3.2	Kasybos poveikio zonos (EDZ) dydis ir struktūra		2
36	B3.3	Hermetizavimo medžiagos (dažniausiai bentonito) brinkimo poveikis talpinančiai uolienai		1
37	B3.4	Uolienų geomechaninės savybės		2
	B4	Hidrauliniai pokyčiai		
38	B4.1	EDZ filtracinės savybės		2
39	B4.2	EDZ prisotinimo laipsnis ir pleišėjimas džiūvant		4
	B5	Pokyčiai dėl susijusių (*coupled*) procesų		
40	B5.1	Susiję termo- hidro-mechaniniai procesai		2
41	B5.2	Brinkimas	C2.3	2
42	B5.3	Savaiminis užsipildymas (plyšių ir porų)	C2.4	2
43	B5.4	Netiesioginiai Onsagerio procesai išskyrus cheminį osmosą		5
44	B5.5	Cheminis osmosas		2
	B6	Pokyčiai dėl dujų išsiskyrimo		
45	B6.1	Dujų tirpimas ir cheminė sąveika su porų tirpalais		1
46	B6.2	Dujų sklaida poromis ir gamtiniais plyšiais		2
47	B6.3	Dujų sklaida plyšiais, atsiradusiais dėl GA poveikio		2
48	B6.4	Dujų paskatinta pernaša vandenyje		2
49	B7	Mikrobiologiniai pokyčiai		3

1	2	3	4	5
	C	Ilgalaikis sistemos vystymasis		
	C1	Diagenezė		
	C1.1	Baseino praeities evoliucija		
23	C1.1.1	Uolienų paleohidrogeologija	A3.1	1
24	C1.1.2	Porų fliuidų (vandens ir dujų) cheminė ir mineraloginė sudėtis talpinančioje uolienoje ir jos aplinkoje	A3.2	1
50	C1.1.3	Grimzdimas geologinėje praeityje		1
	C1.2	Dabartiniai ir ateities procesai		
51	C1.2.1	Dabartinis ir ateities geoterminis režimas ir susiję procesai		4
52	C1.2.2	Hidrogeocheminės sudėties pokyčiai geologinėje ateityje		5
	C2	Deformacijų įvykiai		
53	C2.1	Deformacijos geologinėje praeityje		2
54	C2.2	Lūžių suaktyvėjimas, migracijos kelių pokyčiai, filtracinių savybių pokyčiai, srautų formavimasis		5
41	C2.3	Brinkimas	B5.2	2
42	C2.4	Savaiminis užsipildymas (plyšių ir porų)	B5.3	2
55	C2.5	Dabartinis įtempių režimas		1
56	C2.6	Įtempių režimas ateityje		1
	C3	Erozija ir grimzdimas		
57	C3.1	Geomechaniniai pokyčiai dėl erozijos ar nuokrovos		1
58	C3.2	Konsolidacija dėl grimzdimo		4
59	C3.3	Hidraulinio potencialo ir hidraulinio gradiento kitimas ateityje (dėl erozijos ar grimzdimo)		4

Visi 59 nurodyti SPR buvo suskirstyti į 5 grupes pagal mokslinį supratimą, ištirtumą ir svarbą GA elgsenos analizei atlikti. Grupės buvo skiriamos ir apibūdinamos, remiantis užpildytomis SPR anketomis ir atspindi situaciją apklausoje dalyvavusiose šalyse. Šis skirstymas gali būti laikomas

tam tikromis gairėmis SPR ištirtumui vertinti, bet neturėtų būti priimamas kaip universalus pasaulinis skirstymas ar standartas.

Pirmajai grupei (svarbos grupė 1) buvo priskirti SPR, kurie potencialiai yra svarbūs saugos analizei, ir apklausos dalyviai visuotinai pripažino, kad šie SPR gali būti apibūdinti procesais ir parametrais. Pasaulyje yra prieinami būdai ir metodai šių SPR tyrimams ir kiekybiniam supratimui.

Antrajai grupei (svarbos grupė 2) priskirti SPR, kurių svarba yra skirtinga skirtingoms koncepcijoms ir priklauso nuo tiriamų uolienų ir GA projekto. Šių SPR svarba elgsenos analizei dar turi būti nagrinėjama ir apspręsta, tačiau vertinimas ir apibūdinimas yra būtinas kai kuriose koncepcijose.

Trečiajai grupei (svarbos grupė 3) priskirti SPR, kurių svarba elgsenos analizei ir tinkamumas tam tikroms koncepcijoms nėra vieningai pripažintas, tačiau vertinimas ir apibūdinimas yra būtinas kai kuriose koncepcijose.

Ketvirtajai grupei (svarbos grupė 4) priskirti SPR, kurių svarba elgsenos analizei nėra didelė, tačiau jie pasaulyje yra apibūdinti ir ištirti pakankamai. Skubūs veiksmai šių SPR tyrimui nėra būtini.

Penktajai grupei (svarbos grupė 5) priskirti SPR, kurių svarba GA elgsenos analizei nėra didelė, ištirtumas labai įvairus, žinios ir mokslinis supratimas gana ribotas. Tačiau skubūs veiksmai šių SPR tyrimui nėra būtini.

SPR sąraše (9 lentelė) svarbos grupės nurodytos neplyšiuotoms molingoms uolienoms, kuriose dominuoja difuzija, nes Lietuvoje vertinamos tik tokios molingos uolienos.

Lietuva šio pasaulinio katalogo sudaryme nedalyvavo, todėl buvo tikslinga apibendrinti molingų uolienų tyrimų patirtį, susisteminti SPR remiantis pasaulinio katalogo anketos klausimais ir sudaryti Lietuvos molingų uolienų SPR sąvadą.

Minėtas pasaulinis molingų uolienų SPR sąrašas yra tik vienas iš daugelio pasaulyje sudarytų sąrašų. Apibendrinusi pasaulinę patirtį, NEA yra iniciavusi universalaus, nepriklausančio nuo uolienų, tiriamos vietos ar tyrimų progreso SPR sąrašo parengimą. Tokio sąrašo buvo publikuota keletas versijų. Jis vadinamas tarptautiniu SPR katalogu ir yra nuolat atnaujinamas, nes nuolat vystosi tyrimų metodai ir sisteminimo technologijos. Šiuo metu NEA publikuojama tarptautinio SPR katalogo ir duomenų bazės 3.1 versija, kuri

pasiekiama ir gali būti naudojama interneto priemonėmis *(https://www.oecd-nea.org/fepdb)*.

Pagal disertacijos rengimo metu sukurtą ir 2 skyriuje aprašytą potencialių geologinių formacijų tinkamumo vertinimo metodiką įvertinus Lietuvos potencialias geologines formcijas, buvo nustatyta, kad didžiausiu tinkamumu pasižymi molingų uolienų potencialios geologinės formacijos. Dėl to detaliau buvo analizuojamos tik molingų uolienų savybės, procesai ir reiškiniai. Šiai analizei pasinaudota 9 lentelėje pateiktu pasauliniu molingų uolienų SPR katalogu (Mazurek et. al., 2003).

3.2. Svarbiausi nepažeistos geologinės aplinkos SPR

3.2.1. Medžiagų pernašos procesai

Advekcija ir dispersija. Advekcija- tai procesas, kurio metu ištirpusios medžiagos yra pernešamos skysčio srautu. Ištirpusių teršalų migracija, kurią lemia bendras vandens srautas per geosferą. Advekcijos greitis priklauso nuo hidraulinių, terminių ir tankio sąlygų geosferoje bei GA. Skysčių srautas, kurį lemia temperatūros, cheminiai arba elektriniai gradientai, o ne hidraulinio slėgio gradientai, vadinamas terminiu, cheminiu arba elektriniu osmosu (NEA, 2024). Geologiniuose kūnuose dėl jų heterogeniškumo advekcija gali ženkliai skirtis skirtingose uolienos dalyse. Ištirpusių medžiagų pasklidimas dėl pernašos procesų yra vadinamas (hidrodinamine) dispersija (Dobkevičius, 2001). Nagrinėjant advekciją yra svarbu atskirti sistemas, kuriose dominuoja advekcija ir difuzija. Jei uolienos yra plyšiuotos, ir plyšiai yra laidūs skysčiui, tai pernašos srauto greitis plyšiais yra žymiai didesnis negu neplyšiuotoje uolienos dalyje. Pasaulyje tirtoms molingoms uolienoms GA įrengimui yra būdingas labai mažas filtracijos koeficientas, dažnai mažas hidraulinis gradientas, kas lemia difuzinę pernašą ir nykstamai mažą advekciją ir hidrodinaminę dipersiją (NEA, 2022). Molingose formacijose gali būti ir plyšių. Dažniausiai, ypač, jei molingos uolienos yra plastingos, šie plyšiai yra užpildyti panašia molinga medžiaga kaip ir uoliena, ir juose pernašos advekcinis srautas nesiformuoja. Srauto formavimasis plyšiuose yra būdingas itin konsoliduotoms molingoms uolienoms (Boda formacija Vengrijoje, apatinės juros sluoksniai Tournemire Prancūzijoje ir kt.).

Vertinant advekciją susiduriama ir su mastelio problematika. Dažniausiai filtracijos koeficientas būna nustatomas laboratorijoje ar lauko metodais. Interpoliacija sluoksnio ar formacijos mastu galima tik turint duomenis iš požeminės laboratorijos.

Lietuvoje molingų uolienų filtracijos koeficiento vertės yra nustatytos laboratoriniai metodais tiriant pavienius suardytos ir atkurtos sandaros bandinius arba paskaičiuotos vertinant pertekėjimą per mažai laidžius sluoksnius (Paltanavičius, 1974) Šio koeficiento vertės yra pakankamai mažos, nuo 10^{-12} iki 10^{-10} m/s eilės, kas reiškia galimą nykstamai mažą advekciją abiejų nagrinėtų molingų uolienų sluoksniuose. Lyginant potencialių geologinių formacijų molingas uolienas, mažiausios filtracijos koeficiento vertės yra nustatytos apatinio triaso uolienoms.

3.2.2. Formacijos ir aplinkinių sluoksnių dydis, geometrija, migracijos kelių ilgis.

GA elgsenos vertinimo aspektu sistemos geometrija apibūdinama sluoksnio gyliu, storiu, homogeniškumu ir supančių sluoksnių identifikavimu. Talpinančios uolienos storis ir homogeniškumas lemia advekcinę ar difuzinę galimų teršalų sklaidą. Pasaulyje GA įrengimui tirtos molingos uolienos dažniausiai yra susijusios su konkrečia GA įrengimo vieta ir vadinamos formacijomis. Jos yra tiriamos ir vertinamos gana detaliu masteliu. Tyrimų plotas dažniausiai apima apie 100 km² plotą aplink konkrečią vietą. Pasaulyje labiausiai ištirtos yra šios formacijos: COx- formacija Bure ir apatinės juros sluoksniai Tournemire (Prancūzija), neogeno baseino molis (Ispanija), OPA molio formacija Mont Terri tunelyje ir Ciuricho lygumoje (Šveicarija), Boom molis Mole ir Ypro molis Doelyje (Belgija), Boda molio formacija Mešeke (Vengrija), Micunami grupės (Japonija) molis Tono (NEA, 2022). Pagrindiniai tyrimai, atlikti formacijų ir aplinkinių sluoksnių dydžio, geometrijos, migracijos kelių ilgio vertinimui yra gręžinių gręžimas ir seismininiai tyrimai.

Lietuvoje šis SPR buvo tiriamas ir vertinamas. Tiek apatinio kambro, tiek apatinio triaso molingi sluoksniai yra ištirti gręžiniais, gręžiniuose atlikta standartinė diagrafija. Panaudojant ankstesnių tyrimų faktinius duomenis sudaryti molingų uolienų sluoksnių pjūviai (Kanopienė ir kt., 2004). Migracijos kelių ilgis gali būti įvertintas atsižvelgiant į sluoksnių slūgsojimo gylį, juos dengiančių uolienų izoliacines savybes, regionines hidrogeodinamines sąlygas. Daugiausiai tyrimų atlikta Pagirių anhidrito telkinio vietoje, tačiau šių tyrimų tikslas buvo anhidrito gavyba (Gasiūnienė ir kt., 1992). Vertinant molingų uolienų tinkamumą GA įrengimui buvo priimti sluoksnių slūgsojimo gylio, sluoksnių storio ir homogeniškumo kriterijai. Remiantis šiais kriterijais išskirti regionai, kurių geologiniame pjūvyje aptinkami molingų uolienų sluoksniai (Satkūnas ir kt., 2005). Lietuvoje nėra atlikti tyrimai, susiję su konkrečia GA įrengimo vieta, šiam tikslui nebuvo gręžiami gręžiniai ar atliekami seismininiai tyrimai.

Migracijos keliais yra vadinamos didesnio laidumo skysčiams zonos uolienoje. Jei šios zonos jungiasi tarpusavyje regioniniu mastu, ir egzistuoja hidraulinis gradientas, tai uolienai būdinga advekcinė pernaša. Didesnio laidumo zonos gali būti sedimentacinio pobūdžio (litologiniai nevienodumai kaip smėlingesnių nuosėdų sankaupos) arba tektoninės kilmės (lūžiai, sprūdžiai). Šių zonų savybės erdvėje būna itin kaičios. Lūžiai ir sprūdžiai yra

būdingi tik labai konsoliduotoms molingoms uolienoms. Paprastai tik plyšiai lūžių zonose yra hidrauliškai „aktyvūs“, o kiti nevienodumai būna uždari. Plyšių savaiminis „užgydymas“ yra būdingas plastiškoms molingoms uolienoms. Sedimentacinio pobūdžio laidžios zonos gali būti aptinkamos bet kuriose uolienose.

Mažos, keleto centimetrų, laidumo zonos gali būti pastebėtos atodangose, tuneliuose ir gręžinių kerne. Didesnės (> 10 cm) zonos pastebimos elektrinio zondavimo grafikuose. Lūžiai, kuriems būdingi keleto metrų perstūmimai, yra matomi seisminiuose profiliuose. Tačiau dideliame plote nustatyti didesnio laidumo zonų savybes yra sudėtinga, nes šios zonos dažniausiai yra kertamos gręžinių, tunelių ar kt. Dažniausiai didelių laidumo zonų (plyšiai, vandeningi lęšiai) yra vengiama parenkant GA vietą. Regioniniu mastu padidinto laidumo zonų filtracinės savybės gali būti kiekybiškai įvertintos interpretuojant spūdžių profilius ir analizuojant cheminius traserius (He, Cl, ^{37}Cl, ^{18}O ir ^{2}H) porų tirpaluose.

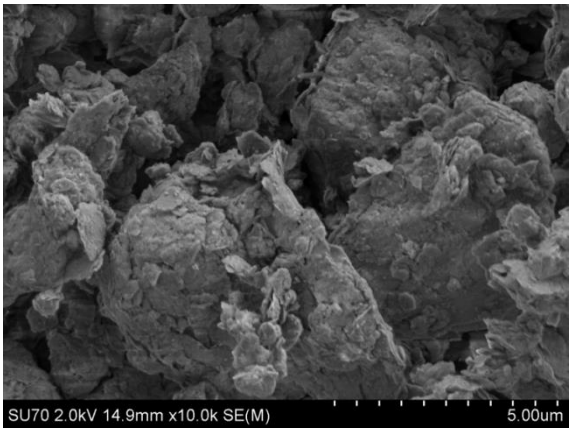
Šis SPR Lietuvoje nėra tirtas konkrečioje perspektyvioje GA įrengimo vietoje. Molingų uolienų plyšiuotumas yra vertintas tik analizuojant gręžinių kerną (11 pav.). Padidinto laidumo zonų filtracinės savybės, plyšių uždarumas ar jų užpildų sudėtis nėra tirta.



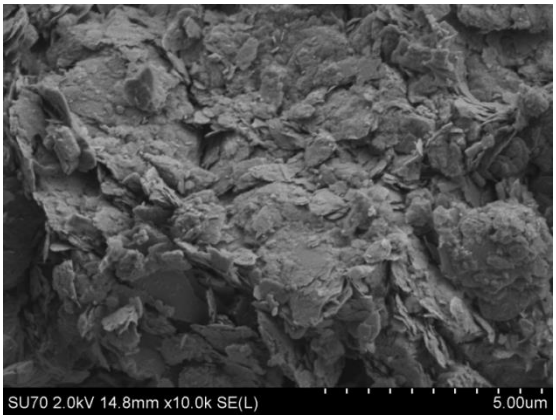
11 pav. Gręžinio Jucaičiai-1 kernas. Plyšiai apatinio triaso uolienose (autorės nuotr.).

Uolienų sandarą iliustruoja ir jų mikrostruktūros vaizdas. Tačiau vykdant tyrimus disertacijos rengimui molingų uolienų mikrostruktūra buvo nustatyta tik suardytos sandaros bandiniuose (12 pav.).

a)



b)



12 pav. Molingų uolienų 5 μm mastelio mikrostruktūros vaizdai. a) - apatinio triaso, b)- apatinio kambro, autorės gauti atlikus tyrimą skenuojančiu elektroniniu mikroskopu.

3.2.3. Trūkstama informacija SPR vertinimui

Šis SPR yra susijęs su savybėmis, kurios šiuo metu negali būti ištirtos dėl reikiamos technikos nebuvimo arba su savybėmis, kurios nėra nustatytos dėl nepakankamų tyrimų.

Sedimentaciniai facijų pokyčiai yra būdingi daugeliui molingų uolienų. Šie pokyčiai dažniausiai yra ištirti ir įvertinti naudojant gręžinių ar atodangų duomenis. Šie pokyčiai nelemia didelių neapibrėžtumų. Lūžiai, priešingai, dažnai negali būti pilnai ištirti, ir tenka priimti įvairias konservatyvias prielaidas, vertinant GA elgseną.

Šiuo metu nėra dokumentuota, kad kurioje nors šalyje tektų žymiai keisti GA koncepciją ar projektą dėl vėliau ištirtų nenustatytų savybių.

Šiuo metu Lietuvoje, kol nėra parengtas nė vienas GA ar kitokio giliojo statinio projektas, daugelis SPR gali būti priskirti nenustatytosioms savybėms. Tačiau, jei egzistuoja pasaulinė praktika vertinant kurią nors savybę, įvykį ar procesą, tai toks SPR negali būti priskiriamas nenustatytiesiems.

3.2.4. Sluoksnių filtracinės savybės

Analizuojant šį SPR filtracinės uolienos savybės suprantamos kaip šios uolienos sugebėjimas praleisti vandenį ir įvertinamos kaip filtracijos koeficientas, filtracinis laidumas, savitasis laidumas ar pralaidumas kartu vertinant ir erdvinį šių savybių kitimą ir dispersijos ilgį. Sistemoms, kurioms yra būdinga filtracija plyšiais, turi būti vertinamas ir efektyvusis poringumas bei plyšių dydis.

Pasaulyje tirtose molingose uolienose yra nustatytas labai mažas (mažesnis už 10^{-10} m/s) filtracijos koeficientas. Šiuo metu yra sukurti pakankamai kokybiški prietaisai tokioms mažoms vertėms matuoti. Matavimai gręžiniuose (pakerių metodas) reikalauja aukštos gręžinių kokybės (sienelių stabilumo) labai atidaus paruošimo, matavimų vykdymo ir analizės.

Lietuvoje mažai laidžių uolienų filtracinės savybės požeminio vandens išteklių vertinimo tikslais buvo tiriamos dar aštuntajame XX a. dešimtmetyje. Filtracinėms savybėms nustatyti buvo naudojami hidrodinaminio gręžinių išbandymo, regioninio požeminio vandens balanso skaičiavimo geoterminiu ir laboratoriniu metodu (Juodkazis, Paltanavičius, 1978). Naudotas laboratorinis metodas nebuvo standartizuotas ir nėra detaliai aprašytas. Tačiau visais trimis būdais buvo gautos panašios filtracijos koeficiento vertės. Apatinio triaso uolienų filtracijos koeficientas kinta nuo $1{,}2 \times 10^{-6}$ iki $9{,}8 \times 10^{-6}$ m/d, o apatinio kambro, apskaičiuotas pagal regioninio požeminio vandens balanso duomenis, kito nuo $1{,}1 \times 10^{-6}$ iki $9{,}2 \times 10^{-6}$ m/d. Lietuvos molingų uolienų filtracijos koeficientas buvo nustatomas ir Belgijos branduolinių tyrimų centre (SCK- CEN). Tyrimai buvo atliekami laboratoriniu metodu, sukurtu ir standartizuotu šiame centre. Bandiniai tyrimams buvo paruošti iš anksčiau gręžtų gręžinių kerno, suardant jų sandarą, o vėliau atkuriant pagal nustatytus fizikinių savybių parametrus. SCK –CEN centre nustatytos filtracijos koeficiento vertės pateikiamos 10 lentelėje.

10 lentelė. Molingų uolienų filtracijos koeficiento vertės, nustatytos Belgijos SCK- CEN centre.

Gręžinio pavadinimas ir Nr.	Bandinio Nr.	Geologinis indeksas	Paėmimo gylis, m	Filtracijos koeficientas k, m/s
Jucaičiai-1	1	T_1	273,2	$8{,}12 \times 10^{-12}$
Jucaičiai-1	2	T_1	315,2	$3{,}33 \times 10^{-12}$
Jucaičiai-1	3	T_1	397,5	$4{,}72 \times 10^{-12}$
Šaškai-2	LT/5	$Cm_{1\,ln}$	498,2	$1{,}61 \times 10^{-11}$
Šaškai-2	LT/6	$Cm_{1\,ln}$	548,2	$1{,}43 \times 10^{-11}$
Šaškai-2	LT/7	$Cm_{1\,ln}$	523,1	$1{,}66 \times 10^{-11}$

3.2.5. Potencialių formacijų hidrogeologinės sąlygos

Talpinančios uolienos hidraulinis potencialas, hidraulinis gradientas, įskaitant ribines sąlygas (SPR Nr. sąraše A.1.1.4). Šis SPR yra susijęs su skysčio srauto (Darcy) jėgomis. Šių jėgų ar srauto tyrimams dažniausiai yra naudojami pjezometrų ar pakerių metodai. Hidrostatinio slėgio matavimai labai mažai laidžiose molingose uolienose yra sudėtingi ir reikalauja labai gerai pritaikytų instrumentų ir preciziško jų įrengimo. Labai svarbūs veiksniai šiuose matavimuose yra hermetiškumas, įrangos mechaninis ir cheminis atsparumas, skysčio cheminė sudėtis, gręžinio sienelių ir matavimo intervalų stabilumas. Sudėtingiausia tokius matavimus atlikti konsoliduotose molingose uolienose. Matavimams reikalingas ilgas (nuo kelių mėnesių iki kelerių metų) kalibravimo laikas (NAGRA, 2022 b.) ir tik ilgalaikiai matavimai gali suteikti realius rezultatus .

Hidrostatinio slėgio matavimai yra atliekami tiek giliuose gręžiniuose, gręžtuose nuo žemės paviršiaus, tiek sekliuose horizontaliuose, gręžtuose požeminių laboratorijų (Prancūzijoje, Ispanijoje, Šveicarijoje, Belgijoje, JAV) sienose. Ribinės sąlygos ir pertekėjimo per molingas uolienas sąlygos dažnai tiriamos gręžiniuose išbandant žemiau ir aukščiau slūgsančius vandeninguosius sluoksnius.

Analizuojant GA elgseną žinios apie šį SPR yra pakankamos. Molingose uolienose dominuojantis medžiagos pernašos procesas yra difuzija, o spūdžio ar hidrostatinio slėgio pasiskirstymas talpinančioje uolienoje yra mažiau svarbus.

Lietuvoje pertekėjimą per analizuojamas mažai laidžias molingas uolienas galima įvertinti analizuojant vandeningųjų sluoksnių hidrodinaminių išbandymų rezultatus. Pavyzdžiui, šiaurės rytinėje Lietuvos dalyje (IAE apylinkės) pertekėjimas per apatinio kambro uolienas vyksta iš viršaus žemyn (Marcinkevičius ir kt., 1995).

Regioninės hidrogeologinės sąlygos (SPR Nr. sąraše A1.1.6) apibūdina hidrodinamines, chemines ir termines GA talpinančios uolienos ribines sąlygas. Aplink talpinančią uolieną slūgsantys sluoksniai gali būti ta aplinka per kurią kenksmingos medžiagos iš GA gali pasiekti biosferą.

Pasaulyje nagrinėtos molingos uolienos dažniausiai slūgso dideliuose nuosėdiniuose baseinuose ir persisluoksniuoja su kitomis nuosėdinėmis uolienomis (klintys, smiltainis, smėlis, mergelis ir kt.). Tokie sluoksniai sudaro regioninius vandeninguosius sluoksnius ir vandensparas. Vandeningieji sluoksniai yra lengviau ištiriami panaudojant klasikinius hidrogeologinius metodus. Tiriant šiuos sluoksnius, stebėjimo taškų skaičius paprastai būna pakankamas. Regioniniu mastu GA talpinančios uolienos filtraciniai parametrai gali būti gaunami iš aplinkinių vandeningųjų sluoksnių hidrogeologinių tyrimų rezultatų. Didžioji dalis pasaulyje tirtų molingų uolienų sluoksnių slūgso tarp dviejų vandeningųjų sluoksnių. OPA molis Šveicarijos Ciuricho apylinkėse slūgso tarp mažai laidžių sluoksnių, skiriančių jį nuo regioninių vandeningųjų sluoksnių.

Lietuvoje regioninės hidrogeologinės sąlygos yra ištirtos gana gerai. Analizuojamų molingų uolienų sluoksniai sudaro regionines vandensparas.

Apatinio kambro Baltijos serijos molingos uolienos Lietuvoje slūgso tarp vandeningųjų sluoksnių. Ordoviko - kambro ir kambro - vendo (ediakaro) vandeningųjų sluoksnių vanduo yra stipriai mineralizuotas (Marcinkevičius ir kt., 1995). Lietuvoje šių sluoksnių vandens ištekliai nenaudojami.

Apatinio triaso molingos uolienos Kauno apylinkėse slūgso ant permo anhidrito, jas dengia juros mažai laidžios uolienos ir Cenomanio- apatinės kreidos vandeningasis sluoksnis. Kitur šias uolienas asloja permo vandeningasis sluoksnis, o dengia – viršutinės juros vandeningasis sluoksnis. Permo vandeningojo sluoksnio požeminis vanduo yra intensyviai naudojamas vakarinėje Lietuvos dalyje. Viršutinės juros vandeningojo sluoksnio vanduo

taip pat yra gėlas, jo ištekliai yra naudojami (Kadūnas ir kt., 2018) kai kuriose vandenvietėse (Raseinių, Seredžiaus, Veiviržėnų ir kt.).

3.2.6. Difuzijos procesas

Difuzija- tai medžiagų pernašos procesas, kai skystos arba dujinės medžiagos molekulės skverbiasi iš didesnės koncentracijos vietų link mažesnės koncentracijos, pagal koncentracijos gradientą, kol pasiskirsto vienodai. Difuzija vyksta visose natūraliose molingose uolienose ir dirbtiniuose molinguose (pavyzdžiui, bentonitas) mišiniuose. Terminas „difuziškumas“ gali būti vartojamas apibrėžiant difuzijos koeficientą, menamą difuzijos koeficientą, difuzinį vingiuotumą. Todėl vartojant šį terminą, jis turi būti aiškiai apibrėžtas. Molingų uolienų difuziškumas yra jų savybė praleisti dujas ir skysčius. Difuzijos koeficientas pasaulyje tiriamose molingose uolienose nustatomas skaitmeninės koncentracijų pokyčių analizės, analitiniu poringumo skaičiavimo profilyje ir traserių metodais.

Lietuvoje analizuojamų molingų uolienų difuzuškumas ar įvairių medžiagų difuzija jose nėra tirti.

3.2.7. Atvirasis matricos poringumas

Atviras matricos poringumas yra uolienos tūrio dalis, kuri formuoja ištisines tuštumas (kelius) įvairių medžiagų (skysčių, dujų) migracijai per uolieną. Vykdant tyrimus įvairiems tikslams atvirasis matricos poringumas gali būti suprantamas skirtingai. Bendras atvirasis matricos poringumas gali apimti surištą porų ar molio mineralų tarpsluoksnių vandenį, todėl jis skirtųsi nuo efektyviojo arba kinematinio poringumo. Minėtas surištas vanduo nėra susijęs su advekcine ir dispersine medžiagos pernaša, tačiau yra svarbus difuzinei pernašai. Molingų uolienų poringumas nustatomas iš uolienos tankio ir gravimetrinių matavimų, drėgmės atidavimo bandymų rezultatų, naudojant skysčio injekcijos metodus ir difuzijos parametrų nustatymo metu. Dėl porų erdvinės struktūros sudėtingumo ir dėl skysčio (vandens tirpalo) sąveikos su molio mineralų paviršiumi skirtingais metodais gaunamos skirtingos poringumo vertės netgi tiriant identiškus uolienų bandinius. Atvirasis matricos poringumas kinta ne tik dėl metodologinių priežasčių, bet ir kaip priklausomybės nuo parinkto skysčio funkcija.

Lietuvoje buvo nustatomas apatinio triaso molingų uolienų poringumo koeficientas ir poringumo rodiklis, tiriant bandinius iš gręžinio

Pagiriai-6. Poringumo koeficientas e kinta nuo 0,381 iki 0,54, o poringumo rodiklis n- nuo 0,276 iki 0,351 (vieneto dalimis).Tačiau tyrimų ataskaitoje (Gasiūnienė ir kt., 1992) nėra dokumentuotas tyrimo metodas ir neapibrėžta, kuris iš aukščiau minėtų poringumų buvo tirtas.

3.2.8. Jonų išsiskyrimas

Membraninės molingų uolienų savybės yra tokios, kad jonai yra išskiriami toliau negu panašaus dydžio neutralaus krūvio tirpalai. Jei molingos uolienos yra konsoliduotos, sluoksneliai tarp molio mineralų plokštelių mažėja, o poros tarp jų sukuria neigiamą krūvį, kuris neleidžia anijonams prasiskverbti pro šias poras. Katijonai taip pat šiek tiek sulaikomi, nes fliuidai porose lieka neutralaus krūvio. Neutralaus krūvio tirpiklis (vanduo) ir tirpalo molekulės gali prasiskverbti pro turinčias krūvį poras, bet jonai yra išskiriami. Šis procesas žinomas, kaip Donnan‘o išsiskyrimas. Nors šis SPR yra svarbus keletui medžiagų pernašos procesų, tačiau pasaulyje atlikta gana nedaug tyrimų jonų išsiskyrimui vertinti. Dažniausiai jonų išsiskyrimas vertinamas kartu su difuzijos koeficiento nustatymu. GA elgsenai modeliuoti dažniausiai yra tiesiogiai naudojamas difuzijos koeficientas. Jonų išsiskyrimo vertinimas padeda nustatyti difuzijos koeficientą toms medžiagoms, kurioms tiesioginius laboratorinius ar traserių tyrimus atlikti yra itin sudėtinga. Lietuvoje šis SPR nėra tirtas ar vertintas.

3.2.9. Radionuklidų sklaidos sulėtinimo procesai

Sorbcija (bendrąja prasme) SPR sąraše apima keletą savybių (Nr. A2.2). Su sorbcija yra susijusi uolienų litologija, mineralogija ir plyšių užpildai. Uolienų litologija ir mineralogija lemia hidrogeologines, chemines, pernašos, mechanines ir kitas savybes. Mineralų elektrocheminė elgsena yra svarbiausia sorbcijos procesams. Uolienos mineralogija nulemia požeminio vandens, esančio uolienoje ir dalyvaujančio sąveikoje su uoliena ir susijusiuose procesuose (osmosas, difuzija, matricos difuzija), cheminę sudėtį.

Plyšių tankis skirtingose uolienose yra skirtingas. Konsoliduotos uolienos yra plyšiuotos, o plyšiuose yra susidarę antriniai mineralai. Plastiškose molingose uolienose plyšių yra daug mažiau ir antrinių mineralų yra mažai arba nėra (Mazurek et al., 2003).

Visų pasaulyje GA įrengimui tirtų molingų uolienų litologinė ir mineraloginė sudėtis yra ištirta gana detaliai. Pagrindiniai tyrimo metodai yra giliųjų gręžinių gręžimas, seisminiai tyrimai, kerno bandinių laboratoriniai tyrimai, įskaitant ir mikrostruktūros tyrimus. Laboratoriniai molingų uolienų bandinių tyrimai yra atlikti tiek įvairių mokslo centrų laboratorijose, tiek specialiai šiam tikslui įrengtose požeminėse laboratorijose.

Molingoms uolienoms yra būdinga facijų, o tuo pačiu ir litologinės sudėties kaita. Dėl to molingi sluoksniai persisluoksniuoja su smėlingesniais ar dulkingesniais. Mineraloginė sudėtis yra gana pastovi, tik daugiau smėlingų dalelių turinčiuose sluoksniuose aptinkama daugiau kvarco ir feldšpatų.

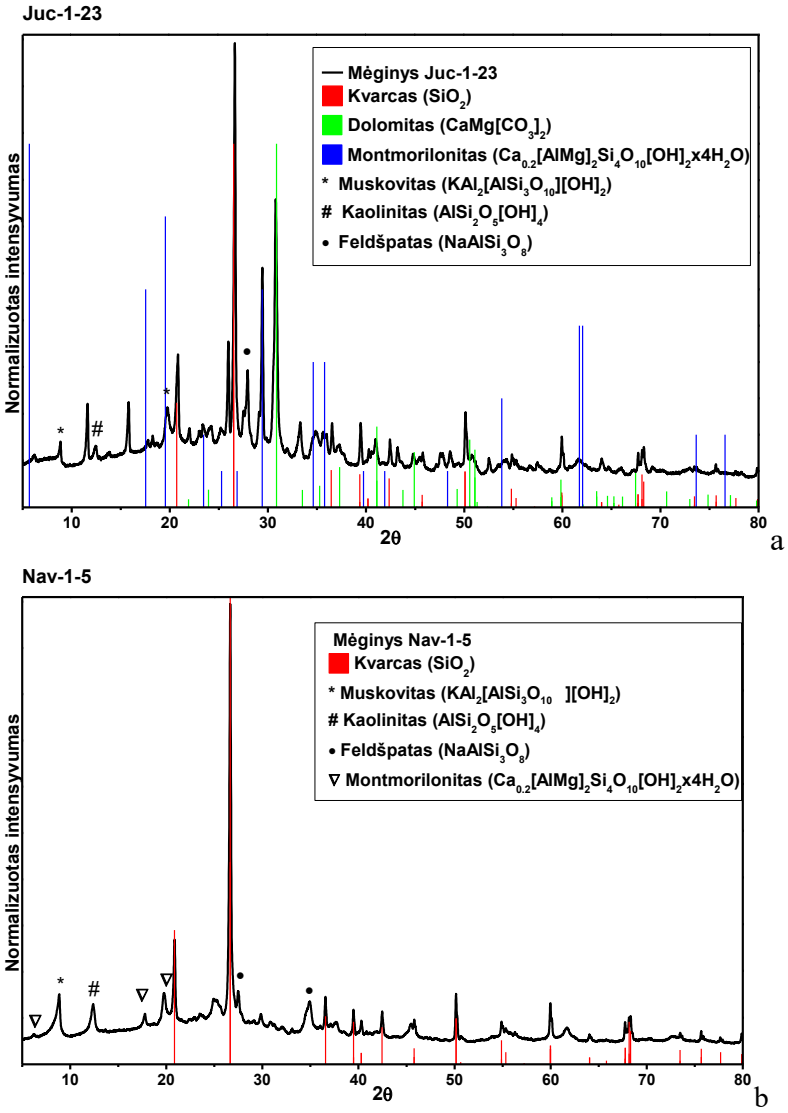
Uolienų heterogeniškumas ir anizotropiškumas vertikalia kryptimi yra įvertintas, nes tyrimams panaudoti didelio kiekio gręžinių duomenys. Sunkiau yra įvertinti uolienų savybių kaitą horizontalia kryptimi ir bendrai erdvėje. Šiam tikslui yra gręžiami horizontalūs gręžiniai požeminėse laboratorijose, atliekamas uolienų masyvų skaitmeninis modeliavimas.

Kita problema, vertinant uolienų litologinę ir mineraloginę sudėtį, yra mastelis. Paprastai yra ištiriami uolienų bandiniai, kurių dydis siekia keletą ar keliasdešimt centimetrų, o planuojamo GA elgsenos analizei reikalingi duomenys apie keleto šimtų metrų ar net kilometrų dydžio uolienų masyvų savybes. Atliekant šią analizę duomenys interpoliuojami, ir priimami tam tikri saugos koeficientai.

Lietuvoje molingų uolienų litologinė sudėtis yra ištirta gana detaliai. Kiek mažiau atlikta mineraloginės sudėties tyrimų. Apatinio triaso ir apatinio kambro molingų uolienų litologinė sudėtis buvo analizuojama pagal giliųjų gręžinių aprašymų, diagrafinių kreivių, gręžinių kerno detalios revizijos ir granuliometrinės analizės duomenis. Buvo sudaryti litofacijiniai pjūviai (Kanopienė ir kt., 2004). Lietuvoje analizuojamų molingų uolienų sluoksniams yra būdinga litologinės sudėties kaita tiek vertikalia, tiek horizontalia kryptimi. Molis persisluoksniuoja su dulkiu, rečiau su smėliu.

Rentgeno struktūrinė analizė (RSA). Rentgeno struktūrinė analizė buvo atlikta naudojant „Bruker D8 Discover" difraktometrą. Tyrimo rezultatai priklauso nuo atomų šiluminių svyravimų gardelėje, nuo vakansijų ir priemaišinių atomų medžiagoje, nuo veiksnių, kurie daro įtaką atstumui tarp atomų (plastinės deformacijos, netolygūs mikroįtempiai), nuo netvarkingos kristalų orientacijos. Taip pat, gali būti įrangos paklaidos (pvz.: krintančių Rentgeno spindulių nelygiagretumas). Analizės rezultatai priklauso ir nuo bandinių paruošimo, ir nuo rentgenogramų apdorojimo (Srodon, 2006).

Lietuvos molingų uolienų mineraloginė sudėtis buvo tiriama rentgenostruktūrinės analizės metodu. Belgijos SCK- CEN branduolinių tyrimų centre buvo ištirti 6 bandiniai. Lietuvoje 2005 metais buvo atlikta mokslinė studija „Triaso molingų uolienų mineraloginės sudėties apibūdinimas ir analizė (vykdytojas dr. A. Špokauskas), kurios metu analizuoti 26 apatinio triaso molingų uolienų bandiniai. Vilniaus Universiteto Chemijos ir geomokslų fakulteto laboratorijose buvo atlikta 6 molingų sluoksnių bandinių rentgenostruktūrinė analizė. Apibendrinant visų šių tyrimų rezultatus, galima teigti, kad apatinio triaso uolienų mineraloginė sudėtis ištirta geriausiai iš visų analizuojamų. Tarp molio mineralų šiose uolienose dominuoja montmorilonitas. Jis sudaro apie 70% visų molio mineralų ir nuo 10 iki 40% visų mineralų uolienoje. Mažiau yra ilito ir chlorito. Iš kitų mineralų aptikta kvarco, kalcito, dolomito, kai kuriuose bandiniuose iš Jucaičiai-1 gręžinio aptikta ir gipso. Apatinio kambro uolienose tarp molio mineralų dominuoja ilitas (hidrožėručiai), kaolinitas, aptikta šiek tiek ir montmorilonito (Marcinkevičius ir kt., 1995). Tarp kitų mineralų dominuoja kvarcas (13 pav.).



13 pav. Skirtingo amžiaus molingų uolienų rentgenogramos: a- T_1, b - Cm_1.

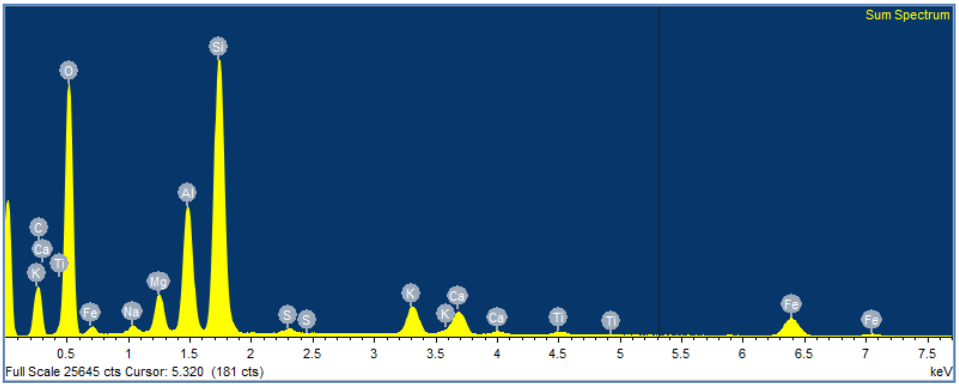
Elektroninė dispersinė spektroskopija (EDS).

Uolienų mineraloginei sudėčiai detalizuoti ir pagrįsti buvo atlikta jų bandinių cheminės elementinės sudėties analizė elektroninės didpersinės spektroskopijos metodu (EDS). Buvo analizuojama 12 apie 1,5- 2 g masės

uolienų miltelių bandinių, sudaryti 4 šios analizės „žemėlapiai“, parodantys pasirinktus elektronų difrakcijos plotus bandinyje. Be nustatytos bendros elementinės sudėties, šis metodas įgalina tiksliai įvertinti metalų priemaišų kiekį bandiniuose. Ištirtuose bandiniuose nustatytos geležies ir titano priemaišos (14 pav.).

Kartu su skenuojančiu elektroniniu mikroskopu naudojama elektroninė dispersinė spektroskopija (EDS). Ja galima analizuoti bandinio paviršiaus elementinę sudėtį. Analizė remiasi principu, kad kiekvienas elementas turi savitą atominę struktūrą. EDS nefiksuoja lengvesnių atomų už borą (H, He ir Li). Tiriant bandinį su SEM gaunami Rentgeno spinduliai. Į nesužadintą atomą krintantis energingas elektronas išmuša to atomo elektroną iš orbitalės. Atsiranda elektrono vakansija, kurią užima elektronas iš aukštesnės orbitalės, taip išlaisvindamas dalį energijos. Ši energija išspinduliuojama charakteringais Rentgeno spinduliais, kurie fiksuojami detektoriumi. Kadangi skirtingų elementų atomai išspinduliuoja skirtingą energijos kiekį, galima analizuoti šį kiekį ir nustatyti elementinę medžiagos sudėtį.

EDS analizė parodė, kad molio mineralus sudarančių elementų – anglies, silicio ir aliuminio (C, Si, Al) – kiekis yra panašus. Skirtumas pastebėtas magnio (Mg) ir kalcio (Ca) kiekio atžvilgiu. Didesnis šių elementų kiekis, siekiantis 6,84 % Mg ir 5,84 % Ca apatinio triaso molyje, galėtų būti grindžiamas didesniu šios potencialios formacijos karbonatingumu ar fliuidų migracija iš dolomito sluoksnių. Tačiau dėl nežinomos mėginių natūralios būklės neįmanoma priskirti elementų konkretiems mineralams. Be to, nustatant anksčiau gręžtų gręžinių nekonservuoto kerno bandinių cheminę sudėtį nėra galimybės įvertinti, ar tam tikri elementai yra gamtinės kilmės ir būdingi konkrečiai uolienai, ar jie yra kerno dūlėjimo, oksidacijos ir kitokių pokyčių pasekmė. Apibendrinti cheminės elementinės sudėties nustatymo rezultatai EDS metodu pateikiami 11 lentelėje.



14 pav. Elektroninės dispersinės spektroskopijos (EDS) tyrimo rezultatų grafinis vaizdas.

Lietuvos geologijos tarnybos prie Aplinkos ministerijos laboratorijoje apatinio kambro ir apatinio triaso molingų uolienų cheminė sudėtis buvo ištirta spektrometru XEPOS HE. Nustatyta 12 bandinių iš gręžinių Leliai 294 (Nr. 8081) ir Pajevonys 13 (Nr. 26301) kerno cheminė (elementinė) sudėtis. Tyrimui atlikti bandiniai buvo paruošti juos susmulkinant (pudra). Tyrimas buvo atliekamas pagal Lietuvos standartą LST EN 15309.

Tyrimo rezultatai parodė panašią elementinę sudėtį kaip ir EDS tyrimo rezultatai. Apatinio triaso molingų uolienų bandiniuose stebimas žymiai didesnis kalcio kiekis, galimai susijęs su karbonatingumu. Kaip vieną iš rentgeno fluorescencinės spektrometrijos metodo trūkumų galima būtų įvardinti tai, kad šiuo metodu gautuose rezultatuose nefiksuojami elementai, esantys dujinėje medžiagoje. Apibendrinti tyrimo rezultatai pateikiami 12 lentelėje.

11 lentelė. Apibendrinti molingų uolienų cheminės sudėties rezultatai (EDS metodas).

Elementas	Min., masės %	Maks. masės %	vidurkis masės %	Matavimų skaičius	Gylio intervalas, m
Apatinis triasas					260,0 – 422,5
C	3,69	22,7	8,56	19	
O	46,49	61,82	55,34	20	
Na	0,16	1,59	0,57	19	
Mg	0,38	6,84	2,75	20	
Al	3,76	11,25	6,99	19	
Si	11,89	31,99	18,44	20	
S	0,15	1,12	0,48	5	
K	1,13	4,13	2,05	19	
Ca	0,2	5,84	2,46	19	
Ti	0,16	1,29	0,37	19	
Fe	2,23	7,39	3,67	19	
Apatinis kambras					516,8 – 558,4
C	3,41	22,57	9,06	18	
O	47,52	60,55	54,27	20	
Na	0,18	1,41	0,44	19	
Mg	0,31	4,49	0,85	19	
Al	2,25	11,40	7,83	20	
Si	14,02	31,03	20,56	20	
S	0,10	0,41	0,20	6	
K	1,15	9,05	3,65	19	
Ti	0,10	0,57	0,28	16	
Fe	0,82	7,71	4,03	19	

12 lentelė. Apibendrinti cheminės sudėties tyrimo rezultatai (Rentgeno fluorescencinės spektrometrijos metodas).

Geologinė formacija	Apatinis triasas	Apatinis kambras	
Elementas	Vidurkis %		
Na	0,642	0,140	
Mg	1,8563	0,987	
Al	5,313	7,193	
Si	19,0469	24,558	
P	0,054	0,059	
S	0,3650	0,154	
K	2,149	4,435	
Ca	8,7962	0,396	
Sc		0,00137	
Ti	0,429	0,539	
V	0,0357	0,0111	
Cr	0,010	0,008	
Mn	0,0893	0,0331	
Fe	4,557	5,149	
Ni	0,0054	0,0030	
Cu	0,005	0,002	
Zn	0,0080	0,0065	
Ga	0,002	0,003	
Ge		0,000412	
As	0,0014	0,000458	
Br	0,000	0,000540	
Rb	0,0144	0,0247	
Sr	0,060	0,0147	
Y	0,0026	0,0050	
Zr	0,027	0,0291	
Nb	0,0021	0,0028	
Sn	0,000	0,0255	
Ba	0,0958	0,0533	
Hf	0,001	0,0010	
W	0,0108	0,0221	
Pb	0,002	0,0021	
Bi	0,0003	0,000388	
Th	0,001	0,00216	

Dalelių paviršiaus plotas. Savitasis uolienos ar mineralo paviršiaus plotas yra aktyvus sorbuojantis paviršiaus plotas uolienos ar mineralo masės vienete. Savitasis paviršiaus plotas gali priklausyti nuo sorbuojamo skysčio. Bendras paviršiaus plotas yra dalelių išorinio ir vidinio paviršių plotų suma. Vidiniu paviršiau plotu suprantamas tarpsluoksnių tarp molio mineralų plokštelių plotas. Išorinis paviršiaus plotas matuojamas, kai adsorbuojamos nepolinės medžiagos (azotas). Bendras paviršiaus plotas matuojamas adsorbuojant polines molekules (vanduo ar etilenglikolis). Vidinis paviršiaus plotas apskaičiuojamas kaip minėtų dviejų plotų skirtumas.

Pasaulyje tirtų molingų uolienų mineralų paviršiaus plotas buvo nustatytas BET analizatoriumi adsorbuojant azotą ir etilenglikolį. Išorinis šių uolienų dalelių paviršiaus plotas kinta nuo 23 (apatinės juros molis Prancūzijoje) iki 65 (neogeno baseino molis Ispanijoje) m^2/g (NEA, 2022). Bendras paviršiaus plotas buvo nustatytas OPA moliui iš Mont Terri tunelio (100- 220 m^2/g), OPA moliui iš Ciuricho apylinkių (56- 107 m^2/g), Boom moliui iš Molo požeminės laboratorijos (200- 250 m^2/g).

Lietuvoje molingų uolienų dalelių paviršiaus plotas buvo nustatomas rengiant šį darbą. Bandiniai tyrimams buvo paimti iš gręžinių kerno, saugomo Žemės gelmių informacijos centro kerno saugykloje. Bandiniai buvo paruošti juos susmulkinant. Bendrojo dalelių paviršiaus ploto tyrimai BET analizatoriumi buvo atlikti Vilniaus Universiteto Chemijos ir geomokslų fakulteto Taikomosios chemijos laboratorijoje. Šiuo metodu ištirti 6 molingų uolienų bandiniai, po 3 iš apatinio triaso ir apatinio kambro sluoksnių. Nustatyto dalelių paviršiaus ploto rodikliai pateikti 13 lentelėje.

13 lentelė. Dalelių paviršiaus ploto nustatymo rezultatai (BET analizė).

Eil. Nr.	Bandinio Nr.	Geologinis indeksas	Dalelių paviršiaus plotas, m^2/g
1	Juc 1-10/1	T_1	54,80
2	Pag 6-16/3	T_1	30,88
3	Juc 1-20/6	T_1	46,32
4	Sched 3-12/16	$Є_1$	30,6
5	Nav 1-3/20	$Є_1$	32,74
6	Vis 5-10/21	$Є_1$	28,04

Uolienų dalelių paviršiaus plotas yra tiesiogiai proporcingas sorbcinei gebai - juo didesnis paviršiaus plotas, juo daugiau medžiagų gali būti adsorbuojama.

Jonų mainai. Jonų mainai yra vienas iš procesų, įtakojančių sorbciją. Jonų mainų aplinkoje yra ceolitų- pastovaus krūvio dalelių molio mineraluose (dažniausiai jų sluoksnių paviršiuje), ir tam tikrų organinių apvalkalų. Jonų mainų pusiausvyrą išreiškia masės lygtys, kuriose neatsižvelgiama į kintamo krūvio paviršius ar elektrostatinius poveikius. Jonų mainai tarp pagrindinių katijonų lemia vandens, esančio molingoje uolienoje cheminę sudėtį. Jonų mainų poveikis pastebimas ir regioninio masto požeminio vandens cheminės sudėties pokyčiams sluoksniuose, kuriuose molio mineralų yra vos keletas procentų.

Pastebimo ištirpusių medžiagų kiekio sorbcija, vykstanti molingose uolienose gali būti vertinama atliekant jonų mainų modeliavimą. Šiuo metodu jonų mainai vertinami didžiojoje dalyje pasaulyje tirtų molingų formacijų. Nustatyti jonų mainų elementai yra natris, kalis, magnis, kalcis, stroncis.

Lietuvoje jonų mainų molingose uolienose modeliavimas nėra atliktas.

3.2.10. Mažai laidžių uolienų porų tirpalai

Porų ir plyšių tirpalų (požeminio vandens) sudėtis yra ištirpusių druskų, dujų, suspenduotų medžiagų koncentracija. Kiti svarbūs hidrogeocheminiai rodikliai yra tirpalų pH, temperatūra, oksidacinis-redukcinis potencialas ir izotopinė sudėtis. Požeminio vandens, besifiltruojančio plyšiais sudėtis yra skirtinga nei tirpalo, esančio molingos uolienos matricoje. Matricos vanduo dar skirstomas į surištąjį, kuris yra adsorbuotas ar struktūriškai įtakojamas molio mineralų paviršių, ir laisvąjį, kuris kaupiasi atvirose uolienos porose.

Plyšių tirpalų sudėtis gali būti nustatoma mėginiuose, paimtuose iš gręžinių ar pjezometrais. Matricos vanduo paimamas molingų uolienų bandinius suspaudžiant ar centrifūguojant dideliu greičiu. Tikroji *in situ* porų tirpalų sudėtis gali būti nustatyta tik plyšiuose esančiam skysčiui. Matricos vandens cheminė sudėtis dėl oksidacijos, dujų kaitos ar kitų procesų bandinių paruošimo metu gali būti pakitusi. Tikrajai šių tirpalų sudėčiai atkurti dažnai naudojamas skaitmeninis modeliavimas. Mėginių paėmimo ir paruošimo būdai porų tirpalų sudėčiai nustatyti yra apibendrinti atskiruose leidiniuose (Sacchi and Michelot, 2000).

Pasaulyje tirtų molingų uolienų porų (tiek plyšių, tiek matricos) požeminis vanduo dažniausiai yra natrio chloridinio, rečiau natrio sulfatinio chloridinio tipo. Šio tirpalo bendroji mineralizacija priklauso nuo uolienos slūgsojimo gylio ir mineralogines sudėties. Dažniausiai ji kinta nuo 3 iki 10

g/l. Didžiausią anijonų dalį šiame tirpale sudaro chloridai, todėl kartais yra tiriama ne visa cheminė sudėtis, o chloridų koncentracija ir jos pasiskirstymo dėsningumai (NEA, 2022).

Lietuvoje nagrinėjamų molingų uolienų porų tirpalų cheminė sudėtis buvo nustatoma bandiniuose, paimtuose iš anksčiau gręžtų gręžinių kerno. Bandiniai buvo specialiai paruošti ir tiriami Belgijos SCK- CEN centre 2003 ir 2008 metais. Buvo ištirti 3 apatinio triaso molingų uolienų bandiniai, paimti iš gręžinio Jucaičiai- 1 kerno ir 3 apatinio kambro Baltijos serijos molingų uolienų bandiniai, paimti iš gręžinio Šaškai- 2 kerno. Tikrosios ištirpusių medžiagų koncentracijos nebuvo nustatytos dėl ilgos kerno oksidacijos, katijonų mainų ir kitų įvykusių procesų, kurie įtakojo porų tirpalų sudėties pokyčius. Hidrocheminė sudėtis buvo nustatoma ištraukos tirpalui, gautam sumaišius suardytą kerną ir distiliuotą vandenį įvairiais santykiais. Tirpalų, gautų ištraukiant skystį iš kerno ir distiliuoto vandens mišinio santykiu 1: 10, cheminės analizės rezultatai pateikiami 14 lentelėje.

14 lentelė. Porų tirpalų cheminės analizės rezultatai. Koncentracijos mišinio 1: 10 ištraukoje mg/l.

Bandinys / gylis, m / Komponentas	Juc1/1 T_1 273,2	Juc1/2 T_1 315,2	Juc1/3 T_1 397,5	Šaš2/5 Cm_1 498,1	Šaš2/6 Cm_1 548,1	Šaš2/7 Cm_1 523,0
B	n d	n d	n d	1,8	1,8	2,2
Ca	n d	1,6	n d	7,6	9,1	5,4
Fe	n d	0,45	n d	<0,02	<0,02	<0,02
K	n d	2,3	n d	46	26,3	40
Mg	n d	0,93	n d	7,2	6,1	3,64
Mn	n d	n d	n d	0,17	0,092	<0,02
Na	n d	81	n d	57	52	247
Si	n d	6,0	n d	22	8,7	7,2
Sr	n d	n d	n d	0,076	0,092	0,071
F –	0,75	0,59	0,39	0,18,	0,39	0,6
Cl –	4,9	4,6	26,9	17,4	19,3	287
Br –	<0,25	<0,25	<0,25	0,484	0,57	0,96
SO4 2–	49	86	157	197	109	137
pH	n d	n d	n d	6,25	7,21	7,81

Lietuvos molingų uolienų porų tirpaluose, kaip ir kitų šalių panašiose uolienose, vyrauja chlorido ir sulfato anijonai ir natrio katijonai. Atlikti tyrimai nėra pakankami tikrajai porų tirpalų sudėčiai nustatyti tiek dėl mažo bandinių skaičiaus, tiek dėl šių bandinių paruošimo tyrimams nulemtų paklaidų.

3.3 Giluminio atliekyno sistemos supratimas ir nepriklausomi metodai prognostinių modelių sudarymui

3.3.1 Potencialių geologinių formacijų paleohidrogeologija

Šis SPR apima geologinės praeities procesus, nulėmusius dabartinę sistemos būklę, ypač diagenezės ir deformacijų veikiamą hidrogeologinį režimą. Paleohidrogeologinių vietos ar regiono sąlygų išaiškinimas yra svarbus visos sistemos supratimui. Paleohidrogeologinių sąlygų aprašai yra parengti OPA molio formacijai Ciuricho apylinėse (Šveicarija) ir Boom molio formacijai Mole (Belgija).

Lietuvoje yra detaliai išnagrinėtos viso Baltijos artezinio baseino paleohidrogeologinės sąlygos (Juodkazis, 1979; Mokrik, 2003), tačiau nagrinėjamų molingų uolienų sluoksnių formavimosi ir vystymosi istoriją galima aprašyti tik remiantis vandeningųjų sluoksnių paleohidrogeologinėmis sąlygomis.

Apatinio kambro uolienos pradėjo formuotis baikalinio tektoninio megaciklo metu prieš 1,-1,9 milijardo metų. Sedimentaciniame infiltraciniame baseino vystymosi etape jūrinės transgresijos sąlygomis kaupėsi itin smulkios frakcijos terigeninės nuogulos. Vėliau šis sluoksnis ne kartą buvo besikeičiančiose jūrinėse ir kontinentinėse sąlygose. Jame buvo susikaupęs magni natrio chloridinis vanduo. Devono periodu apatinio kambro molingame sluoksnyje vyko aktyvi požeminio vandens metamorfizacija, jonų mainai, nuogulų konsolidacija ir litifikacija. Sedimentacinis vanduo dėl baseino grimzdimo buvo išstumtas į aukščiau ir žemiau slūgsančius sluoksnius. Manoma, kad iš apatinio kambro molių per geologinę istoriją išsiskyrė nuo 15 iki 60 mln m^3 /km^2 vandens. Teigiama, kad dabartinis sluoksnio poringumas susiformavo devone (Mokrik, 2003), nes uolienos slūgsojo panašiame gylyje.

Apatinio triaso sluoksnių formavimasis priskiriamas alpiniam tektoniniam megaciklui, kurio metu susidarė priekalnių idaubos. Šiose įdaubose aridinio klimato seklios jūros sąlygomis klostėsi terigeninės nuogulos.

Baltijos artezinis baseinas priskiriamas platforminiam. Šiam baseinui buvo sudarytas raidos modelis. Visų nagrinėjamų molingų uolienų sluoksniai Lietuvoje sudaro regionines vandensparas. Šios vandensparos ir jų aplinkoje slūgsantys vandeningieji sluoksniai vystėsi trimis paleohidrogeologinio vystymosi etapais: sedimentaciniu- infiltraciniu, eliziniu ir reinfiltraciniu. Šiems etapams yra būdingos skirtingos vandens cheminės sudėties formavimosi ir hidrodinaminio režimo sąlygos (Mokrik, 2003).

3.3.2. Porų fliuidų raida

Porų fliuidų (vandens ir dujų) cheminės sudėties ir mineralų raida talpinančioje uolienoje ir jos aplinkoje. Šis SPR apima uolienoje esančių fliuidų (vandens ir dujų) ir vandens- uolienos reakcijų pokyčius baseino vystymosi praeityje. Tai yra informacijos apie dabartinių fliuidų cheminę sudėtį ir uolienos mineraloginę sudėtį apibendrinimas. Nagrinėjant mineraloginę sudėtį, yra svarbi informacija apie uolieną sudarančių mineralų struktūrą, formą, pasiskirstymą jų cheminę ir izotopinę sudėtį ir kitas ypatybes, kaip fliuidų inkliuzai, kurie gali parodyti dabar ar geologinėje praeityje vykusias aktyvias uolienos- vandens reakcijas ar pernašos procesus. ir atvirkščia, tokių mineralų ar reakcijų nebuvimas gali parodyti fliuidų prasiskverbimo ribas praeityje. Žinios apie vykstančius ir praeityje vykusius fliuidų ir mineralų raidos procesus suteikia galimybę parinkti vertinamus procesus atliekant GA elgsenos analizę.

Pasaulyje nagrinėjamų molingų uolienų porų tirpalai yra tiriami tiek laboratoriniais metodais, tiek modeliuojant. Pavyzdžiui, Boom molio kietos ir skystos fazių sudėtis rodo, kad porų tirpalai yra pusiausvyroje su moliu. Ankstyvi diagenezės procesai šiame molyje lėmė organinės medžiagos skaidymąsi, dėl ko susidarė pirito ir karbonatų konkrecijos. Mineralų tirpimo/ kristalizacijos, galėjusios vykti vėlesnės diagenezės metu, požymių nepastebėta.

Lietuvoje molingų uolienų porų tirpalai yra labai mažai tirti. Šių tirpalų raida geologinėje praeityje nėra dokumentuota.

Šis SPR yra susijęs su vandens amžiumi uolienoje, kaip sistemos supratimo požymiu ir kaip su rodikliu prognozinių modelių sudarymui. Terminas „amžius“ šiuo aspektu yra laikas, kurį elementarus vandens ar tirpalo tūris ar masė yra „prabuvęs“ uolienoje. Makroskopinis vandens ar tirpalo mėginys yra sudarytas iš daugelio elementarių vienetų, turinčių

skirtingą amžių. Viso bandinio amžius suprantamas kaip jį sudarančių elementų amžiaus tūrio svorio vidurkis.

Vandens ar tirpalų amžius gali būti įvertinamas pagal filtracines uolienos savybes ir srauto geometriją, pagal izotopų koncentraciją, pagal stabilius izotopinius ar cheminius vandens mitybos sąlygų ar tirpalų susidarymo indikatorius (Mokrik ir kt., 2014). Hidrodinaminių procesų modeliavimo, skirto GA elgsenos analizei, tikslumas išauga, jei sumodeliuotas vandens amžius yra panašus kaip ir nustatytas (Mazurek et al., 2003).

Pasaulyje daugelyje požeminių laboratorijų buvo tiriamas porų tirpalų amžius. Jis buvo nustatomas pagal deuterio, tričio, radioaktyviųjų anglies, deguonies, helio izotopų koncentracijas. Porų tirpalų amžiaus nustatymas dažnai yra itin sudėtingas, ypač plyšių tirpalams. Dėl pastovaus maišymosi su matricos porų tirpalais ir kitų sluoksnių vandeniu matavimai nėra tikslūs.

Lietuvoje apatinio kambro ir apatinio triaso molingose uolienose esančio porų tirpalų amžius nebuvo nustatytas. Dvimačiuose požeminio vandens srauto modeliuose molingų uolienų sluoksniai vertinami kaip kūnai, kuriuose srauto nėra ir priimama tokia modelio ribinė sąlyga (Gregorauskas ir kt., 2017)

LIETUVOS TERITORIJOS GEOLOGINIŲ SĄLYGŲ TINKAMUMO GA ĮRENGIMUI APIBENDRINIMAS

Lietuvoje GA įrengimą reglamentuojantys teisės aktai (VATESI, 2016, VATESI, 2017) nurodo, kokios RA turi būti dedamos į atliekyną, Plėtros programoje pateikiamos GA įrengimo projekto pagrindinės dalys, tačiau geologinės aplinkos ir vietos parinkimo procesas nėra reglamentuotas. Geologiniai tyrimai, susiję su GA vietos parinkimu, iki 2025 metų yra vykdomi esamų duomenų analizės pagrindu. Šame darbe yra išanalizuoti tiek tarptautinis, tiek Lietuvos GA įrengimo reglamentavimas ir pasaulinės praktikos, vykdant GA projektus, pavyzdžiai. pateikiama Lietuvoje anksčiau atliktų geologinių tyrimų GA įrengimui apžvalga. Remiantis pateikta apžvalga gali būti planuojami tolesni geologiniai tyrimai GA įrengimui tose šalyse, kuriose yra analizuojamos planuojamos tirti uolienos.

Rengiant darbą buvo sukurta nauja potencialių geologinių formacijų tinkamumo GA įrengimui vertinimo metodika, pagrįsta 23 įvairios svarbos tinkamumo kriterijais. Kriterijų svarbai ir reikšmingumo svoriui nustatyti remtasi sisteminės analizės ir hierarchinio daugiakriterinio vertinimo principais. Pagal sukurtą metodiką potencialių geologinių formacijų tinkamumas įvertinamas balais, kurie apskaičiuojami įvertinus kiekvieno kriterijaus vertės tinkamumą, šio kriterijaus reikšmingumą ir geologinių veiksnių arba GA elgsenos scenarijų reikšmingumą. Nustatyti tinkamumo kriterijai apibūdina potencialių geologinių formacijų sudėtį, GA saugai reikšmingiausias savybes ir slūgsojimo sąlygas. Panaudojant sukurtą metodiką yra įvertintas trijų Lietuvos potencialių geologinių formacijų tinkamumas GA įrengimui. Apatinio triaso potenciali formacija yra įvertinta 31,43 balo, apatinio kambro – 30,4 balo, kristalinio pamato – 29,5. Sukurta metodika galėtų būti pritaikyta Lietuvos GA vietos parinkimo procese. Atlikus esamų geologinių duomenų analizę sukurta metodika galėtų būti pritaikyta ir kitų šalių potencialių geologinių formacijų tinkamumo GA įrengimui vertinimui.

Atlikus potencialių geologinių formacijų tinkamumo vertinimą pagal sukurtą metodiką, matyti, kad molingų uolienų formacijų tinkamumas yra didesnis negu kristalinių uolienų formacijos. Todėl darbe yra susisteminti molingoms uolienoms būdingi ir GA saugai svarbūs SPR, analizuojami jų tyrimų rezultatai, įvardijami duomenų trūkumai Lietuvoje. Kiekybiniam molingų potencialių geologinių formacijų tinkamumo palyginimui buvo atliktas keletas anksčiau išgręžtų gręžinių kerno bandinių laboratorinių tyrimų. Šių tyrimų rezultatai negali būti naudojami GA saugos vertinimo

procese dėl uolienų kerno būklės (drėgmės, temperatūros, oksidacijos ir kitų procesų įtaka), tačiau uolienų tinkamumo palyginimui galėtų būti naudojami kaip papildomi kriterijai ar tinkamumo indikatoriai. Atlikus apatinio triaso ir apatinio kambro potencialių geologinių formacijų uolienų laboratorinių tyrimų rezultatų palyginimą, galima teigti, kad dėl montmorilonito mineralo kiekio sudėtyje ir didesnio dalelių paviršiaus ploto apatinio triaso molinga potenciali geologinė formacija pasižymi palyginti didesniu tinkamumu GA įrengimui negu apatinio kambro potenciali geologinė formacija. Šis palyginimas yra sąlyginis, nes buvo ištirtas mažas bandinių kiekis ir nebuvo atsižvelgta į bandinių paruošimo galimą įtaką tyrimų rezultatams.

IŠVADOS

Atlikus Lietuvos ir kitų šalių didelio aktyvumo RA sutvarkymo reglamentavimo analizę, galima teigti, kad daugumoje valstybių yra nustatyta tvarka didelio ir vidutinio aktyvumo ilgaamžių RA dėjimui į GA. Tačiau GA vietos ir geologinės aplinkos parinkimo procesas nėra griežtai reglamentuotas. Šis procesas priklauso nuo šalių geologijos mokslo tradicijų, pasaulinės gerosios praktikos įsisavinimo ir savalaikių politinių sprendimų priėmimo. Lietuvoje GA vietos parinkimo procesas turi būti reglamentuotas, atsižvelgiant į pasaulinę praktiką ir geologinės aplinkos tinkamumą šiam tikslui.

Remiantis sukauptais duomenimis apie Lietuvos geologines sąlygas, pasauline tyrimų GA įrengimui praktika ir panaudojus sisteminės analizės principą bei daugiakriterinės analizės metodą buvo sukurta geologinės formacijos tinkamumo GA įrengimui vertinimo metodika. Šios metodikos panaudojimas suteikia galimybę parinkti tinkamiausią geologinę aplinką GA įrengimui Lietuvoje ir optimizuoti geologinius tyrimus GA vietos parinkimo procese.

Panaudojus sukurtą potencialių geologinių formacijų tinkamumo vertinimo metodiką ir Lietuvoje sukauptus geologinius duomenis, rengiant disertaciją įvertintas apatinio triaso (T_1) molingų uolienų, apatinio kambro molingų uolienų ($Є_1$) ir kristalinio pamato potencialių geologinių formacijų tinkamumas GA įrengimui Lietuvoje.

Atlikus molingų potencialių geologinių formacijų svarbiausių savybių, procesų ir reiškinių analizę ir ribotos apimties anksčiau išgręžtų gręžinių nekonservuoto kerno laboratorinius tyrimus, nustatyta, kad apatinio triaso molingų uolienų potenciali geologinė formacija pasižymi palankesne GA saugai mineralogine sudėtimi ir didesniu molingų uolienų dalelių paviršiaus plotu, lemiančiu palankesnes sorbcines savybes, negu apatinio kambro potenciali geologinė formacija.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Ahlroth, S., Nilsson, M., Finnveden, G., Hjelm, O., Hochschorner, E. 2011. Weighting and valuation in selected environmental systems analysis tools – suggestions for further developments, Journal of Cleaner Production, Volume 19, Issues 2–3, 2011, Pages 145-156, ISSN 0959-6526. *https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.04.016.*

ANDRA, 2024. Agence Nationale Pour la Gestion des Dechets Radioactifs. Cigeo Project: Industrial Centre for the Reversible Deep Geological Disposal of Radioactive Waste in the Meuse/Haute-Marne Area." ANDRA. Accessed Jun. 10 2024. Available from: *https://international.andra.fr/sites/international/files/2024-05/Andra_Plaquette_Cigeo_MAJ_JANV%202024_V3_EN.pdf.*

ANDRA interneto svetainė https://www.andra.fr/.

Bitinas J., Baliukevičius A., 2019. Lietuvos tektoninė schema M1:500 000. Lietuvos geologijos tarnyba, Vilnius, 2019. https://lgt.lrv.lt/apie-lietuvos-/zemes-gelmes/prekvarteras/lietuvos-tektonine-schema/.

Chapman N. A., McEwen T. J., & Beale, H. (1986). Geological environments for deep disposal of intermediate level wastes in the United Kingdom (pp. p. 311–328.). IAEA.

Čyžienė J., Šliaupa S., 1999. Lietuvos prekvartero geologinio žemėlapio M 1:200 000 revizija. Ataskaita. Lietuvos geologijos tarnyba. - Vilnius, 1999.

Čyžienė J, Šliaupa S Lazauskienė J, Baliukevičius A, Satkūnas J 2005. Characterization of the Lower Cambrian Blue Clays for deep geological disposal of radioactive waste in Lithuania. Geologija, .52, p.11-21.

Čyžienė, J., Lazauskienė, J., Lozovskis, S., Žilinskaitė, J., Bitinas, J., Pačėsa, A., Baliukevičius, A., Lokutijevskis, V., Radienė, R., Arustienė, J., Pūtys, P., Kanopienė, R., Minkevičius, V., Antušas, S., Dumšienė, A., Januška, V., Gudonytė, J. 2022. Geologinės aplinkos tinkamumo giluminiam radioaktyviųjų atliekų atliekynui geologinių kriterijų nustatymas. Ataskaita. Lietuvos geologijos tarnyba, Vilnius. 38 p.

Čyžienė, J., Lazauskienė, J., Lozovskis, S., Žilinskaitė, J., Bitinas, J., Pačėsa, A., Baliukevičius, A., Lokutijevskis, V., Radienė, R., Arustienė, J., Pūtys, P., Kanopienė, R., Minkevičius, V., Šinkūnė, E., Jusienė, A. 2023. Potencialiai tinkamų giluminio radioaktyviųjų atliekų atliekyno įrengimui formacijų detali analizė ir potencialių teritorijų prioretizavimas pagal pagrindinius geologinius atrankos kriterijus. Ataskaita. Lietuvos geologijos tarnyba, Vilnius. 99 p.

Coll C., Escoffier S., Li X.L., Hamza R.W., Vervoort A., Blümling P., Bastiaens W., Berest P., Bazargan B., Frieg B., Desrues J., Viaggiani G., Labiouse V., Dehandschutter B., Wouters L., Vanbrabant Y., Mertens J., Bernier F., 2004 "State of the art on Fracturation and Self-Healing Processes and Characterisation", EC SELFRAC Deliverable 1, EURIDICE 04-114. *https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=e68d95cef1e48dd018339a53d6498fb8df03356f.*

Elliott SJ, Forstner SR, Wang Q, Corrêa R, Shakiba M, Fulcher SA, Hebel NJ, Lee BT, Tirmizi ST, Hooker JN, Fall A, Olson JE and Laubach SE (2025) Diagenesis is key to unlocking outcrop fracture data suitable for quantitative extrapolation to geothermal targets. Front. Earth Sci. 13:1545052. doi: 10.3389/feart.2025.1545052

Gasiūnienė V. E., Valavičius A., Marcinkevičius V., Mikšys R-B. 1992. Svodnyj otčet o razvedke mestoroždenija angidrita Pagirjaj Kaunasskogo rajona s zaključeniem o gornogeologičeskich i gidrogeologičskich uslovijach provodki stvola šachty *[Kauno r., Pagirių anhidrito telkinio suvestinė žvalgybos ataskaita su kasybos ir hidrogeologinių sąlygų išvadomis šachtai įrengti]* VVGĮ. Vilnius, 1992. 305 p. (rusų k.).

GNS - NUKEM konsorciumas, LEI, Branduolinės inžinerijos problemų laboratorija. 2007. Panaudoto RBMK branduolinio kuro iš Ignalinos AE 1 ir 2 blokų laikinas saugojimas. PAV ataskaita.

Gregorauskas M., Kaušinis K., Bujanauskas M., Samalavičius V., Mokrik R. 2017. Cenomanio-apatinės kreidos sluoksnio požeminio vandens išteklių ir hidrocheminių anomalijų modelinis įvertinimas. Geologija. Geografija. 2017. T. 3(2). ISSN 2351-7549.

GTK Geological Survey of Finland, 2021. "Geologists Extend Finland's Landscape Evolution Into Deep Time-One of the Oldest Valleys on Earth Found in Southern Ostrobothnia." GTK homepage. Accessed Jun. 10 2024. Available from: https://www. gtk.fi/en/current/geologists-extend-

finlands-landscape- evolution-into-deep-time-one-of-the-oldest-valleys- on-earth-found-in-southern-ostrobothnia/.

He J., Zhou Y.X., Zheng G.S. 2020 Research on the geological suitability evaluation system of underground space resource utilization in Beijing. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, Volume 16(04), pages 955-966.

Hoseini, Y., Kamrani, M. 2018. Using a fuzzy logic decision system to optimize the land suitability evaluation for a sprinkler irrigation method, Outlook on agriculture, Volume 2018, page(s) 298-307 *https://doi.org/10.1177/0030727018798381*.

International Atomic Energy Agency (IAEA), 2006. Fundamental safety principles : safety fundamentals. – Vienna, – (IAEA safety standards series, ISSN 1020-525X; No. SF-1) STI/PUB/1273 ISBN 92–0–110706–4.

International Atomic Energy Agency (IAEA), 2011 a.Geological disposal facilities for radioactive waste: specific safety guide. - Vienna, (IAEA safety standards series,, ISSN 1020–525X ; No. SSG-14) STI/PUB/1483 ISBN 978–92–0–111510–2 Includes bibliographical references.

International Atomic Energy Agency (IAEA), 2011 b.Disposal of radioactive waste. - Vienna; - (IAEA safety standards series, ISSN 1020–525X ; No. SSR-5) STI/PUB/1449 ISBN 978–92–0–103010–8 Includes bibliographical references.

International Atomic Energy Agency (IAEA), 2024. Roadmap for implementing a geological disposal programme. - Vienna - (IAEA nuclear energy series, ISSN 1995-7807 ; no. NW-T-1.43. https://doi.org/10.61092/iaea.80st-qaw7.

Iwaro, J., Mwasha, A., Williams, R. G., Zico, R. 2014 An Integrated Criteria Weighting Framework for the sustainable performance assessment and design of building envelope, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 29, 2014, Pages 417-434, ISSN 1364-0321, *https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.096.*
(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113006369).

Jankauskas T. 2002. Cambrian stratigraphy of Lithuania. Vilnius. 256 p.

Juodkazis V., Paltanavičius J., Artezinių vandeningų horizontų sąveikos tyrimas gamtinėse ir dirbtinėse sąlygose (Pietų Pabaltijo

vandenviečių pavyzdžiu). - Lietuvos geologijos institutas. Vilnius. - 208 p., 1971 (rusų k.).

Kadūnas K., Pūtys P., Gedžiūnas P.; ats. red. Satkūnas J. 2018. Lietuvos požeminis vanduo: Hidrogeologijos atlasas. Lietuvos geologijos tarnyba, Grunto valymo technologijos. – Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, 2018. – 173, [3] p. – ISBN 978-609-459-884-5.

Kadūnas V., 1993 - Ecogeological appreciation of the Upper Permian anhydrite seam from the point of arrangement of depositories. *Geologija,* 15. 27-31 (in Lithuanian).

Kadūnas V. Lietuvos permo halogeninė formacija: litologija, geochemija, naudingosios iškasenos. – Vilnius: Geologijos institutas, 2001. – 191 p.: iliustr. – ISBN 9986-615-31-3.

Kanopienė R., Marcinkevičius V., 2000. Possibilities for developing deep radioactive waste repository in Lithuania. Földtani Közlöny No 130/2, pp 251-261 (2000) Budapest.

Kanopienė R., Lazauskienė J., Šliaupa S., Baliukevičius A., Bitinas J., Pozingis A., Mažeika J., Jakimavičiūtė-Maselienė V., Marcinkevičienė G., 2003. Geologinės formacijos parinkimas panaudoto branduolinio kuro ir ilgaamžių radioaktyviųjų atliekų giluminiam kapinynui įrengti, 2003 m. darbų etapas. Mokslinio techninio darbo ataskaita. Lietuvos Geologijos tarnyba, Radioaktyviųjų atliekų tvarkymo agentūra, Vilnius. 46 p.

Kanopienė R., Lazauskienė J., Šliaupa S., Baliukevičius A., Giedraitis R., Pozingis A., Mažeika J., Jakimavičiūtė - Maselienė V., 2004. Kristalinio pamato ir alternatyvių geologinių formacijų tinkamumo panaudoto branduolinio kuro ir ilgaamžių radioaktyviųjų atliekų giluminiam kapinynui įrengti tyrimai. Mokslinio tyrimo darbo ataskaita. Lietuvos geologijos tarnyba.

Kanopienė R., Lazauskienė J., Šliaupa S., Čyžienė J., Baliukevičius A., Šačkus V., Krinickienė B., Levčenkaitė I., Špokauskas A., De Craen M., Gedeon M., 2005. Apatinio triaso molio geologinės formacijos tinkamumo įrengti giluminį RA kapinyną apibūdinimas. Mokslinio darbo ataskaita. Lietuvos geologijos tarnyba, Radioaktyviųjų atliekų tvarkymo agentūra, Vilnius.

Kanopienė R, Gadeikis, S. Formation selection methodology for deep geological repository in Lithuania. Baltica, 2022, 35 (2), 147–155.

Kanopienė, R., Gadeikis, S. 2023. Geology for Planning and Construction of Deep Geological Repository of Radioactive Waste (Lithuanian Case). In: Barros, J.A. O., Kaklauskas, G., & Zavadskas, E. K. (Eds.), MBMST 2023. Lecture Notes in Civil Engineering (Vol. 392, pp. 659–667). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44603-0_68.

Kanopienė, R., 2024. Suitability investigations of Lithuanian clay formations for the deep geological repository of radioactive wastes. In: Abstracts of 9th Clay conference, Hanover, Germany, 25–28 November 2024. https://zenodo.org/api/records/15071293/files/133_Clay2024.pdf/content

Katinas V., 2015. Triasas. Visuotinė lietuvių enciklopedija, T. XXIV (Tolj–Veni). – Vilnius: Mokslo ir enciklopedijų leidybos institutas, 2015. 116-117 psl.

Kondratas A., 1969. Mineraliniai vandenys. TSRS hidrogeologija. T 32 (Lietuvos TSR). Maskva. „Nedra“.1969. P. 299 – 313 (rusų k.).

Leverd P. C., 2024. The World Leading Deep Geological Repository Projects: A Synthetic Description of the High-Level Waste Long-Term Management Facilities Programmed in Finland, Sweden, France and Switzerland and an Overview of the Deep Geological Repository Site Selection Methodology [Internet]. Vol. 22, Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology(JNFCWT). The Korean Radioactive Waste Society; 2024. p. 503–522. Available from: *http://dx.doi.org/10.7733/jnfcwt.2024.040.*

Lietuvos Respublikos Valstybinės atominės energijos saugos inspekcija VATESI, 2016. Branduolinės saugos reikalavimai BSR-3.2.2-2016 Radioaktyviųjų atliekų atliekynai.

Lietuvos Respublikos Valstybinės atominės energijos saugos inspekcija VATESI, 2017. Branduolinės saugos reikalavimai BSR-3.1.2-2017 Radioaktyviųjų atliekų tvarkymas branduolinės energetikos objektuose iki jų dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną.

Marcinkevičius, V., Bucevičiūtė, S., Vaitonis, V., Guobytė, R., Dansevičienė, D., Račkauskas, V., Kanopienė, R. 1995. Otchet o provedennoj kompleksnoj geologo-gidrogeologičeskoj i inžinerno-geologičeskoj s'emke m-ba 1:50000 v rajone Ignalinskoj AES Litovskoj Respubliki, Latvijskoj Respubliki i Respubliki Belarus'. *[Ataskaita už atliktą 1: 50 000 mastelio kompleksinę geologinę – hidrogeologinę ir inžinerinę geologinę nuotrauką Ignalinos AE rajone Lietuvos, Baltarusijos ir Latvijos Respublikų teritorijoje]*. Lietuvos geologijos tarnyba. Vilnius, 1995 (rusų k.).

Mazurek M., Pearson F. J., Volkaert G., Bock H. „Features, events and processes evaluation catalogue for argillaceous media“ OECD, 2003, NEA4437; ISBN 92-64-02148-5.

Mendoza, G. A. (1997). Introduction to Analytic Hierarchy process: Theory and applications to Natural Resources, Management. In *Proceedings of 1997 ACSM/ASPRS Annual Convention* (Vol. 4, Resource Technology, pp. 130–139). Seattle, WA: ACSM/ASPRS.

Mikšys R. B., 2004. Nuosėdinių uolienų masyvų inžinerinių savybių ypatumai. Geologija 2004, T 47. pp. 44-53.

Mokrik R. 2003. Baltijos baseino paleohidrogeologija. Neoproterozojus ir fanerozojus. Monografija. Vilnius.

Mokrik R., Mažeika J., Juodkazis V., Štuopis A. 2014. Isotope geochemistry and modelling of the multi-aquifer system in the eastern part of Lithuania. Hydrogeology Journal. 22(4): 925–941.

Nagra, 2022 a. The site for the deep geological repository – Nagra’s proposal, Nagra, Wettingen, Switzerland, September 2022.

Nagra, 2022 b. 2021 Annual Report. Available from: https://nagra.ch/wp-content/uploads/2022/08/Nagra_2021_GB_E.pdf. (2024-06-10).

NEA, 2001. Organisation for Economic Co-Operation and Development, Nuclear Energy Agency, “Stepwise Decision Making in Finland for the Disposal of Spent Nuclear Fuel Radioactive Waste Management”, Workshop Proceedings, OECD-NEA, November 15-16, Turku, Finland (2001).

NEA, 2019 International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste Version 3.0. NEA/RWM/R(2019)1.

NEA, 2020. Management and Disposal of High-Level Radioactive Waste: Global Progress and Solutions. OECD 2020 NEA No. 7532. Available at: *https://www.oecd-nea.org/fepdo/list/international%20FEP%20List/3.1/*

NEA, 2022. Clay Club Catalogue of Characteristics of Argillaceous Rocks: 2022 Update, Radioactive Waste Management, OECD Publishing, Paris, https://doi.org/10.1787/8860f7d8-en.

NEA, 2024 (a). Underground Research Laboratories (URLs) – 2024 Update.

NEA, 2024 (b). International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste Version 3.1. NEA/RWM/R(2024)2.

NUKEM Technologies GmbH; LEI, Branduolinės inžinerijos problemų laboratorija, 2008. IAE naujojo kietųjų atliekų tvarkymo ir saugojimo komplekso PAV ataskaita.

NUMO, interneto svetainė, 2025. https://www.numo.or.jp/en/jigyou/new_eng_tab01.html 2025-08-25.

NWMO interneto svetainė, 2025. *https://www.nwmo.ca/canadas-plan/canadas-deep-geological-repository#* 2025-08-25

Paltanavičius J., 1974 Issledovanie vzaimosvjazi artezianskich vodonosnych gorizontov zony intensivnogo vodoobmena Litovskoj SSR. Dissertacija na sosiskanie učenoj stepeni kandidata geologo-min. Nauk. *[Lietuvos aktyvios vandens apykaitos zonos artezinių vandeningų horizontų sąveikos tyrimas. Geologijos - mineralogijos mokslų kandidato disertacija]*, 1974, Vilnius, Lit. NIGRI, 250 p., (rusų k.).

Paltanavičius J., 1979. Ocenka uslovij zaščiščennosti napornych vodonosnych gorizontov Južnoj Pribaltiki ot poverchnostnogo zagrjaznenija. *[Pietų Pabaltijo spūdinių vandeningų horizontų apsaugotumo nuo paviršinės taršos vertinimas]*, 1979, Vilnius, Lit. NIGRI. 216 p., (rusų k.).

Paltanavičius J., 1983. Isledovanie migracii zagrjaznjajuščich veščestv i migracionych parametrov v tipovych gidrogeologičeskich uslovijach Litovskoj SSR. Zaključitel'nyj otčet o naučno-isledovatel'skoj rabote. *[Migracinių parametrų ir teršiančių medžiagų migracijos tyrimai tipinėse Lietuvos TSR hidrogeologinėse sąlygose. Galutinė mokslinių tyrimų ataskaita]*,1983 Vilnius, Lit. NIGRI, 250 p., (rusų k.).

Paškevičius J., 1994. Baltijos respublikų geologija. Monografija. Vilnius, Valstybinis leidybos centras.446 p.

Paškevičius J., 1999: Stratigraphy of Vendian, lower and middle Paleozoic and its problems. (Lietuvos mokslas. Geomokslai. Monografija) Science of Lithuania. Geosciences. Monograph. Vilnius; 96-129.

Pohjonen M. and Mustonen S., 2023. Safe Final Disposal of Spent Nuclear Fuel in Finland", INMM 36th Spent Fuel Management Seminar, February 2022.

Satkūnas J. (editor), Kanopienė, R, Šliaupa, S., Lazauskienė, J., Mažeika, J., Maselienė, V., Baliukevičius, A., Giedraitis, R., 2005. Investigations of Possibilities to Dispose of Spent Nuclear Fuel in Lithuania: a Model Case. Volume 1: Suitability of Geological Environment in Lithuania for Disposal of Spent Nuclear Fuel; Geological Survey of Lithuania, Institute of Geology and Geography. - Vilnius: Geological Survey of Lithuania, 2005. - 66 p. UDK 621.039.75: [55:551.242.03] (474.5)

SAVAGE, D. (Ed.), 1995. The Scientific and Regulatory Basis for the Geological Disposal of Radioactive Waste, Wiley, New York.

Selzer P., Shao H., Behrens C., Lehmann C., Seydewitz R., Lu R., Kreye P., Rühaak W., Kolditz O., 2024. The value of simplified models of radionuclide transport for the safety assessment of nuclear waste repositories: A benchmark study, Journal of Contaminant Hydrology,Volume 267, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2024.104417.

Srodon J., 2006. Identification and quantitative analysis of clay minerals. In: *Developments in clay science*, Vol. 1. Elsevier. DOI: 10.1016/S1572-4352(05)01028-7.

Swift, Peter N., 2010. Regulatory standards for permanent disposal of spent nuclear fuel and high-level radioactive waste.

Šliaupa S. 2019 Giluminės geotermijos geologinės prielaidos Lietuvoje. Lietuvos geotermijos asociacijos seminaro medžiaga, Vilnius.

Thegerstrom C, 2021. Application for License Under the Nuclear Activities act. Svensk Kärnbränslehantering AB. Accessed Jun. 10 2024. Available from: *https://www.skb.com/wp-content/uploads/ 2017/01/1282973-KTL-ans%C3%B6kan-p%C3%A5- engelska.pdf.*

Tóth E., Hrabovszki E., Schubert F., Tóth T. M., 2022. Discrete fracture network (DFN) modelling of a high-level radioactive waste repository host rock and the effects on its hydrogeological behaviour. Journal of Structural Geology. Vol. 156, (2022), 12 p. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2022.104556.

Valstybinės atominės energetikos saugos inspekcija VATESI, 2016. Branduolinės saugos reikalavimai BSR-3.2.2-2016 „Radioaktyviųjų atliekų

atliekynai“, patvirtinti VATESI viršininko 2016 m. lapkričio 30 d. įsakymu Nr. 22.3-188.

Valstybinės atominės energetikos saugos inspekcija VATESI, 2017. Branduolinės saugos reikalavimai BSR-3.1.2-2017 „Radioaktyviųjų atliekų tvarkymas branduolinės energetikos objektuose iki jų dėjimo į radioaktyviųjų atliekų atliekyną“, patvirtinti VATESI viršininko 2017 m. liepos 31 d. įsakymu Nr. 22.3-132 .

Vetrennikov V., Žvykas A. i dr., 1987. Tektonika, vozrast i formacionnaja prinadležnost' železorudnych obrazovanij dokembrija Belorussii i Pribaltiki *[Tectonics, dating and formational membership of Precambrian iron-ore deposits in Belarus and the Baltic*] / Pap // Tektonika, facii i formacii zapada Vostočno-Evropejskoj platformy. - Minsk, 1987. - S. 15-30 : kart.

WNA, 2024. Word Nuclear Association. March 25 2024. “Country Profiles: Nuclear Power in Sweden.” WNA homepage. Accessed Jun. 15 2024. Available f*rom: https://wna. origindigital.co/information-library/country-profiles/ countries-o-s/sweden*.

Zakarevičius A., 2003.Dabartinių geodinaminių procesų Lietuvos teritorijoje tyrimas. Vilnius. Technika, 2003. 195 p.

Žvykas A., Marfin S., Skripkina T., 1985. Novye dannye o geologičeskom stroenii i veščestvennom sostave železnych rud Varenskoj železorudnoj zony [New data on the geological structure and material composition of iron-ores from Varėna ore-bearing zone] // Geologičeskie issledovanija i izučenie mineral'no-syr'evoj bazy Litovskoj SSR. - V., 1985. - S. 117-119 : tabl .(rusų k.).

Žvykas A., 1993. Lazdijų ploto giluminio geologinio kartografavimo rezultatai [Deep geological mapping in the Lazdijai area] // Geologijos akiračiai. - 1993. - Nr. 1. - P. 17-21 : iliustr. - Santr. angl.

SUMMARY

Introduction

The objective of the study is to develop a methodology for assessing the suitability of geological environment for the construction of a deep geological repository for radioactive waste and to determine the feasibility of its application in the Lithuanian conditions.

Research object is the stratigraphic conditions, properties, processes, and phenomena of the rocks comprising the geological environment of the Lithuanian territory under examination, which determine the suitability of the geological environment for the construction of a safe deep geological repository for radioactive waste. The study analyzes the suitability criteria, their importance, and the possibilities for their assessment. Based on a systematic approach and multi-criteria analysis, a methodology for geological formations suitability evaluation adapted to Lithuanian conditions is developed. According to the new methodology the suitability to install the deep geological repository of several geological formations in Lithuania are evaluated.

Formulation of the problem. Between 1983 and 2009, while the Ignalina Nuclear Power Plant was operating in Lithuania, a large amount of radioactive waste was generated, which poses a threat to the environment and human health. Lithuanian legislation and international obligations require that highly radioactive long-lived waste should be disposed of in a deep geological repository. The most important factor determining the long-term safety of a deep geological repository for radioactive waste is a suitable geological environment. However, there is no methodology for assessing the geological formations suitability. In Lithuania, only a very small number of potentially suitable formations direct studies have been conducted, the results of which could be used to assess the suitability of these formations.

Tasks of the work

1. Analysis of existing data on potential geological formations within Lithuanian territory for the construction of a deep geological repository for radioactive waste.
2. Establishment and justification of criteria for assessing the suitability of potential geological formations.
3. Development of a methodology for assessing the suitability of potential geological formations.
4. Assessment of several potential geological formations—crystalline basement rocks, Lower Cambrian clay, and Lower Triassic clay—using the developed methodology.

5. Conducting laboratory tests on rock cores from potential geological formations, the results of which can be used to compare the suitability of these formations.

Scientific novelty of the work

A new methodology has been developed for assessing the suitability of potential geological formations in Lithuania for the construction of a safe deep geological repository for radioactive waste, incorporating both quantitative and qualitative criteria. The methodology was developed by combining the principles of systematic analysis and multi-criteria hierarchy evaluation. An assessment of the suitability of potential geological formations in Lithuania for the construction of a deep geological repository was conducted using the developed methodology.

Practical Significance of the Research Results

The methodology developed can be applied under current conditions using the available data in Lithuania and will enable further research to focus on a detailed characterization of the most suitable potential geological formations.

Once the geological environment has been assessed according to the established criteria, the methodology developed can be adapted to conditions in other countries.

The results of geological investigations, an assessment of Lithuania's geological conditions, and a methodology for the geological formation suitability evaluation of potential geological formations for the disposal of deep radioactive waste. This methodology can be used to investigate options for the safe management of long-lived radioactive waste in Lithuania, and, after evaluating the geological environment according to established criteria, can also be adapted to conditions in other countries.

Defended statements

1. The suitability of various potential geological formations for the construction of a deep geological repository for radioactive waste can be assessed by developing a methodology based on systematic analysis and multi-criteria evaluation.
2. The methodology for assessing the suitability of geological formations for the construction of a deep geological repository should be adapted to Lithuanian conditions.
3. The suitability of geological formations for the construction of a deep geological repository must be assessed using criteria based on national and international requirements and global best practices.
4. A quantitative assessment of the suitability of geological formations for the construction of a deep geological repository must be based solely on

the results of direct studies of the properties, processes, and phenomena of these formations.

Approval of Research Results

The topic of the dissertation has resulted in the publication of two articles in peer-reviewed scientific journals. The results of the research conducted for the dissertation were presented in papers at three scientific conferences.

Structure of the dissertation

The dissertation consists of an introduction, three main sections (an analysis of radioactive waste management regulations and global practices; a description of the development and application of a methodology for assessing the suitability of potential geological formations for the construction of a deep repository; and the systematization, analysis, and investigation of properties, processes, and phenomena), conclusions, a bibliography, a summary in English, a biography of the author, and a list of publications related to the dissertation topic.

1. Analysis of radioactive waste management regulations and international practice

Nuclear power plants started generate electricity since 1954 and now such plants operate in 32 countries producing about 10 % of total electric power in the world. Nuclear power causes relatively small air pollution. However it produces radioactive waste (RW) that is one of the most harmful for the living environment. Safe RW management is an important task worldwide that is regulated at national and international levels and requires comprehensive research and international co-operation.

The wastes have been classified according to their radioactivity and each class requires particular facility for the final disposal. High level and long lived RW have to be disposed off in the deep geological repositories (DGR) in many countries. As it is pointed out in the safety requirements of the International Atomic Energy Agency (IAEA) safety of the DGR should be ensured by a multibarrier system. The first barrier of the DGR system is the matrix where the wastes are immobilized, the second one is a corrosion-resistant container, the third is a backfill with high sorption capacity and the last one is a suitable geological formation.

The main source of radioactive waste in Lithuania is the Ignalina Nuclear Power Plant (INPP). It generates more than 99.9% of all radioactive waste . Radioactive waste in Lithuania is also generated through the use of

radioactive sources and materials in medical facilities, scientific laboratories, and industry.

Radioactive waste is classified according to the half-life of radionuclides (short-lived and long-lived) and the intensity of radioactive radiation (uncontrolled, very low-level, low-level, intermediate-level, and high-level) at INPP. Very low-level radioactive waste consists of waste whose radionuclides decay relatively quickly and no longer have an impact on the environment. The ionizing radiation from such waste decreases to levels harmless to humans and the environment within approximately 100 years. The ionizing radiation from low- and medium-level short-lived radioactive waste decreases to levels harmless to humans and the environment in about 300 years. SNF and other highly radioactive long-lived waste can remain hazardous for up to 100,000 years. Special radiation safety engineering barriers are required to store this waste.

Since May 1999, the spent nuclear (SNF) fuel, after being stored in special water ponds, is removed from there, loaded into CASTOR RBMK-1500 or CONSTOR RBMK-1500 casks and transported to an interim storage facility in the industrial territory of the INPP. The SNF can be stored in these casks for 50 years. Almost one-half of this period already passed. This makes the elaboration of the SNF final disposal option very important. The SNF is assigned to the radioactive wastes and direct disposal of it is foreseen in Lithuania. European Council Directive 2011/70/Euratom of 19 July 2011 establishing a Community framework for the responsible and safe management of spent fuel and radioactive waste (Directive) is being in force in all member states of the European Union. According to the Directive all radioactive wastes should be managed and finally disposed of in the territory of the country where those are produced. For the implementation of this Directive the special program and action plan of radioactive waste management had been created in Lithuania. According to 2022 data, the projected amount of SNF and other long-lived radioactive waste to be stored in the DGR is 2,416 tHM (tons of heavy metals) of PBK and approximately 10,000 tons of other long-lived radioactive waste. The deep geological repository (DGR) for Lithuanian SNF and high-level long-lived radioactive wastes is planned to design and construct by 2067 (*https://www.iae.lt/veikla/giluminis-radioaktyviuju-atlieku-atliekynas/911 2025-04-28)*.

The primary goal of safety is to protect people and the environment from the harmful effects of ionizing radiation. The main radiation safety requirements for the entire life cycle of a nuclear power plant are specified by a global organization International Atomic Energy Agency (IAEA) in the

safety fundamentals (IAEA, 2006), safety requirements (IAEA2011(b)) and other documents.

Several legal acts regulate the management of radioactive wastes in Lithuania:

The Law of the Republic of Lithuania on Radioactive Waste Management;

The "2021–2030 Program for the Decommissioning of Nuclear Facilities and the Development of Radioactive Waste Management," approved by Resolution No. 76 of the Government of the Republic of Lithuania on February 3, 2021;

Nuclear Safety Requirements BSR-3.2.2-2016 "Radioactive Waste Repositories", approved by the order of State Atomic Energy Safety Inspectorate of November 30, 2016 No 22.3-188;

Nuclear Safety Requirements BSR-3.1.2-2017 "Management of radioactive waste at nuclear facilities prior to its disposal in a radioactive waste repository", approved by the order of State Atomic Energy Safety Inspectorate of July 31, 2017 No 22.3-132;

International practice

The Nuclear Energy Agency (NEA) operates within the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). Recently, NEA has published numerous publications summarizing radioactive waste management practices. In 2020, the publication "Management and Disposal of High-Level Radioactive Waste: Global Progress and Solutions," a global review of deep geological repository development, was released. OECD 2020 NEA No. 7532, which reviews the experience of Finland, France, Sweden, the U.S., China, Canada, Germany, Switzerland, and Japan in HLW disposal and their ongoing research programs. These countries can be considered the most advanced in the field of HLW disposal. They have selected HLW disposal sites and established underground research laboratories. A HLW disposal facility has already been built in Finland and is expected to receive an operating license in the near future. In Sweden, documents have been submitted to the responsible authorities to obtain such a license. The Aspo underground laboratory in Sweden is already being closed, and research is no longer being conducted there. Various studies in all of these countries took between 29 and 50 years before a decision on the GA site was made.

Scientific consensus is not easily gained. Since the 1980s, scientific investigation into the feasibility of DGRs for the safe disposal of SNF/HLW has proceeded at a cautious and deliberative pace that has significantly expanded the volume (and quality) of scientific information and data regarding the safety of geological disposal. Consistent with the strategy for

long-term safety research, investigations have been undertaken to evaluate the safety barriers of the DGR concept (e.g. waste package, backfill material, site characteristics). Dozens of underground research laboratories have been built to investigate and optimise the engineering of a DGR and to collect information to further advance the understanding of specific rock characteristics to isolate and contain waste and manage the uncertainties. All the scientific information has been made available to all as part of the open scientific dialogue that provides for constructive discussion and peer review to continuously advance understanding of the safety provided by a DGR.

Today there is scientific consensus that DGRs provide the best solution for the disposal of HLW and SNF. Uncertainties are associated with any complex endeavour. The possibility of finding suitable sites for a DGR is no longer a question – suitable sites have been identified in a variety of rock types. The geological stability of a good site provides the stable environment to optimise the performance of a DGR and allows for the evaluation and responsible management of the uncertainties such that safety of a DGR can be demonstrated and assured. There is scientific consensus that, based on demonstration in URLs, DGRs provide a safe disposal solution.

The most advanced DGR programs have been carried out in the countries where the mining industry is high developed (NEA, 2020). Many difficulties of DGR planning and investigations could be solved by co-operation of the experts from the industry and science. However, there are no mining activities in Lithuania and geological information is available only from the land surface and boreholes.

Overview of previous investigations in Lithuania

Installation of Lithuanian deep geological repository (DGR) for the SNF and long-lived radioactive wastes has been started to analyse as an option of such wastes management at the very end of the last century. Geological investigations take a large part of DGR programs of the countries around the world. The Lithuanian project for the first stage (prospective investigations) of the long-term geological investigations was compiled by Lithuanian geological survey (LGT) in 1999. All the data about geological structure of Lithuania are accumulated at LGT. This information could be divided in to four main groups: borehole data, geological, geophysical mapping data, raw material prospecting and exploration data, results of technical geological investigations summarised in the reports. There are data about more than 2600 deep boreholes (depth more than 200 m) stored in State geological information system. Geological mapping at a scale 1: 200 000 covers all the territory of Lithuania. Some geological formations (systems) are investigated in detail

during oil, rock salt, anhydrite and other mineral resources prospecting and exploration projects. The reports of different geological investigations have been constantly used as the archive data in the process of the selection of geological formation for the DGR in Lithuania.

In the period of last 20 years Lithuanian projects of geological investigations for DGR sitting had been carried out in co-operation of LGT, Vilnius University, Nature research centre (former Institute of geology and geography), Energy institute, Institute of Physics and radioactive waste management organisations. International co-operation also was an important part of the activities. Lithuanian experts of geology took part in the co-operation projects with radioactive waste management companies and research institutions (Swedish SKB, Swiss Nagra, Belgian SCK-CEN and many others).

According to the international recommendations from IAEA and scientific literature data the main geological criteria of the DGR site selection were determined during the first stage of the prospective investigations project, and maps of potentially suitable geological formations had been compiled. These maps were based on the areas of occurrence, depth, thickness and petrographic composition of the geological strata.

During the period from 2001 and 2006 small projects related to the geological investigations for the DGR installation were carried out by LGT in co-operation with Lithuanian Radioactive waste management agency (RATA), Geological and geographical institute and other institutions. The very general overview of geological conditions, positive and negative screening of the territory of Lithuania were performed till 2003. Areas of occurrence of the potentially suitable formations were used for the positive screening and data on protected areas, deposits of mineral resources, groundwater well-fields, potentially active tectonic zones, deep palaeoincisions and the territories near state borders were used for the negative one. The possibilities to dispose SNF and long-lived radioactive wastes in crystalline rocks of Lithuania were analysed in 2004. The most important geological issues analysing crystalline and sedimentary rocks were identified. The tectonic movements and faulting of Lithuanian crystalline basement were examined in detail. Lithology and lithofacies of the potentially suitable for DGR Lithuanian sedimentary rocks were analysed and detailed geological and lithological cross-sections were elaborated (Čyžienė et al., 2005, Satkūnas et al., 2005). The geological studies of 2005 were aimed to the characterisation of lower Triassic clay suitability for DGR installation. Despite the revision of previous investigations results and old borehole core, several tests of clay samples had been performed.

Samples were taken from the old boreholes, drilled in the areas of suitable depth of occurrence, core. Analyses of grain size distribution, plasticity and mineralogical composition were performed in different Lithuanian laboratories. Experiments for the establishment of pore water chemistry and hydraulic conductivity were carried out in Belgian nuclear science centre SCK-CEN. According to the results of performed tests the quantity of the grains (133 samples tested) smaller than 0,002 mm diameter (fines) varies from 10 up to 60% (statistic average 31,6%). The average plasticity (plastic index Ip) of the fine fraction (27 samples tested) is 0,193. The obtained results show the dominance of smectite among the clay minerals in the lower Triassic samples. The experiments of pore water chemistry and hydraulic conductivity determination did not match the requirements of standards. However, the results show that the type of pore water might be (only 3 samples tested) sodium sulphatic and hydraulic conductivity of lower Triassic samples vary from $3{,}33 \times 10^{-12}$ to $8{,}12 \times 10^{-12}$ m/s. The region of INPP, the major producer of Lithuanian radioactive wastes, was considered as very convenient for the DGR installation from the social and economic point of view. The project with the aim to evaluate the suitability of INPP region's geological environment for The DGR installation was carried out in 2006. The desk top study had been performed on the basis of comprehensive geological mapping of INPP region at a scale 1 :50 000 completed in 1993 (Marcinkevičius et al., 1993). There were 6 deep boreholes drilled to the depths of 750 – 800 m and reached the rocks of crystalline basement. All the sequence of sedimentary cover was described in detail during the mentioned mapping project. Furthermore, the hydrogeological conditions of the region had been evaluated and several wells had been tested for groundwater dynamic parameters. The hydrodynamic scheme of the INPP region was compiled during the project of 2006. It provides the vertical directions of hydraulic gradient and would be useful for the hydrogeological modelling of the region.

The significant part of the activities related to the DGR program development was the international co-operation. Lithuanian experts together with Swedish International Project of Nuclear safety (SIP) and Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB) implemented the programme of competence development in Lithuania in the area of SNF disposal in the period from 2001 to 2004. There were annual workshops held in Dubingiai during the mentioned co-operation program. The results of the program were published in the special issue in 2005. Co-operation with Swiss Nagra and Belgian SCK-CEN was devoted to the transfer of know-how and analysis of clay investigations. The particular emphasis was put on in situ testing in underground laboratories and modelling of the DGR near field and far field

behaviour. The visits to the underground laboratories and theoretical courses for Lithuanian geologists were included into international co-operation projects (Kanopienė, Gadeikis, 2023).

The comprehensive DGR project has been carried out by INPP since 2019. A large part of the project is related to geological investigations and LGT is responsible for this part of the DGR project. The aim of the proximate decade investigations is to select the geological environment and several alternative sites for DGR.

1. Creation of the geological formation suitability evaluation methodology

The further analysis of all possible alternatives requires the elaboration of four different disposal concepts. For economical and saving time purposes it is more reasonable to select one or two the most suitable geological formations in the process of the DGR concept development and then to select several alternative sites for further investigations. The suitability of the geological formations should be evaluated according to the DGR safety and performance assessment criteria. A clear methodology or technique is needed to perform such evaluation. The DGR design and construction is very long - time process. That is why the methodology should be simple enough and understandable also for the political decision-makers of our time and in the future.

The methodology created during doctoral studies relies on the safety requirements and recommendations established by International Atomic Energy Agency (IAEA, 1994; IAEA 2011(b)). The systematic approach, worldwide generally applied criteria (Mallants et al. 2018) and multiple criteria analysis are used as a basis of the methodology.

General requirements for the DGR installation

The DGR is a challenging complex of surface and underground structures consisting of geological environment and technological installations. The suitability evaluation of the geological formation and the site for DGR should be based on the principles of radiation protection and responsibility for future generations. The principles had been set by IAEA (IAEA 1981) in the eighth decade of the last century. According to those principles man should be protected for the period of time during which wastes remain a potential hazard and future generations should not have to bear the costs or harmful consequences of the measures necessary to ensure the protection of man and his environment.

The DGR should be installed deep enough and should not appear near the land surface because of geological processes during the period of time while the wastes have the radioactivity higher than the admissible level. The geological formation should be thick enough to provide a sufficient buffer zone between DGR and the boundaries of overlaying and underlaying strata or tectonic zones. The geological structure where the DGR is planned to install and surrounding structures could be called the DGR system. The system should remain stable while the wastes become not hazardous to the human environment. The walls of underground openings should be isolated and investigation boreholes should be sealed to avoid the radionuclide appearance in the human environment. The DGR should be installed at a site where the exploration of mineral resources is inexpedient to avoid the mechanical damage of DGR system. There should not be the groundwater flow in the geological formation, where the DGR is planned to install, to avoid a rapid radionuclide transport from the waste packages to the environment. Unacceptable chemical reactions between the wastes and groundwater as well as retardation of radionuclides should be foreseen. The DGR engineering constructions should be resistant to the thermal and radioactive impact.

Geological formation suitabilility evaluation

Selecting a geological formation is the task to find some optimal conditions. Solving the task requires to make decisions at each stage of evaluation. Decisions in many cases could be subjective and could depend on the different opinions of decision-makers. To decrease such a dependence the methodology of evaluation should be used. The suggested methodology relays on the principals of analytic hierarchy process (AHP) (Saaty 1995; Mendoza 1997; He et al. 2020) and multicriteria evaluation (MCE) (Hoseini and Kamrani 2018). Each geological factor could be characterized by one or several criteria and one criterion could characterize several factors. For example, the factor “suitable properties of rocks” could be characterized by the bulk density, thermal conductivity, compressive strength and other parameters used as criteria. On the other hand, the criterion “permeability of rocks” is related with factors of isolating properties of the system and radionuclide retardation possibility.

Importance of possible events and processes for the DGR system performance

When installing the DGR the situations of system instability, accidental fast release of radionuclides from the repository and unpredictable performance of the system should be avoided. Those situations caused by

geological factors could be called scenarios of the DGR performance. For example, intensive tectonic uplift could cause the appearance of geological formation at the land surface. Active faulting could damage the engineered constructions or cause the fractured zones as the migration pathways within the geological formations.

The significance of the scenarios is different evaluating the DGR constructability and long-term safety. Scenarios of the highest significance are those causing the mechanic damage or a collapse of the DGR system and could be called catastrophic. Next group of scenarios could cause the accidental fast release of radionuclides from the DGR and could be called accidental scenarios. Scenario of unpredictable consequences is caused by geological factor that is not investigated enough so far or the changes of some features can not be predicted for a long period of time. Such scenarios could be called scenarios of uncertainties and assigned to the third group of significance. There are several geological factors causing the improvement of mechanical or hydraulic properties of the geological formations. Self-sealing of the fractures could be an example. Scenarios caused by such geological factors comprise the fourth group of significance (table 2). According to the significance of the DGR performance scenario the significance rank is given to the groups of geological factors and criteria that is a multiplier coefficient with values from 4 to 1 in a final evaluation formula (Kanopiene, Gadeikis, 2022).

Criteria for the geological formation suitability evaluation

Each feature, event or process that is characteristic to a certain geological environment and is important to the DGR system stability and safety could be used as a criterion for the formation or site selection. According to IAEA the criterion is the condition on which a decision or judgement can be based (IAEA 1994). It may be qualitative or quantitative and should result from established principles and standards.

The selection of geological formation and site for DGR should be performed according to the relevant criteria characteristic to a certain geological factor and satisfying the mentioned requirements of the DGR constructability and long-term safety. According to the global practice each criterion should be obtained from the results of relevant investigations or qualitatively evaluated and accepted by several professional experts. Comparison of the geological formations' suitability is possible when each formation is evaluated by the same set of criteria.

Geological criteria related to important geological factors and grouped according to the significance rank are presented in table 1.

Table 1. Criteria grouped by DGR performance scenarios (Kanopiene, Gadeikis, 2022).

Significance rank (SR)	Scenario of DGR performance	Criteria for evaluation
4	Mechanical damage of DGR system (catastrophic).	1. Sufficient strength. 2. Formation dimensions. 3. Seismic activity. 4. Occurrence of active faults. 5. Temperature. 6. Tectonic regime. 7. Velocity of vertical movement. 8. Mineral resources
3	Fast release of radionuclides from DGR system caused by migration of groundwater or gases (accidental).	1. Occurrence of waterproof rocks. 2. Hydrodynamic regime of the saturated zone. 3. Distance from discharge areas. 4. Radionuclide solubility in groundwater. 5. Occurrence of rocks with high sorption capacity (above the DGR system)
2	Uncertainties in radionuclides' migration predictions (unpredictable).	1. Structure of groundwater or gas flow. 2. Climate impact on DGR system. 3. Glaciation impact on DGR system.
1	Radionuclide retardation increase in the DGR system (improvement)	1. Layering of sedimentary cover. 2. Occurrence of basal rocks. 3. Self-sealing of the fractures.

The significance rank is given to each criterion of the group as a multiplier and calculating the final suitability score (SS) for the geological formation suitability index (SUI) of each criterion will be multiplied by 4, 3, 2, or 1.

Another task of the geological formations' suitability evaluation is the determination of the importance of each criterion in relation to other criteria of the same group. This could be called weighting of criteria (Ahlroth et al.

2011, Iwaro et al. 2014). There are several weighting methods described in the literature (Odu 2019). The pai-wise comparison method seems to be applicable in the suggested methodology. That is the method where the decision-maker compares each criterion with others and determines the level of preferences for each pair of such criteria. Total weight of all criteria in one group is equated to 1. The weight of each criterion could be understood like a part or percentage of the total weight of the criteria group.

The suitability index should be given for each value of the parameter (criterion) that is obtained from the results of investigations or determined qualitatively. Indexes from 5 (very suitable) to 0 (unsuitable) are given to each value of criteria in the first group. Zero suitability could be suggested to give to the criteria of the first group which will mean unsuitable and exclude the formation from further evaluation. In the case of DGR installation this will mean the geological formation where catastrophic scenario of performance is possible. Indexes from 4 (suitable) to 1 (least suitable) should be given to the criteria of the second group, from 3 (suitable) to 1 (least suitable) – for the third group and 2 (suitable) or 1 (least suitable) – for the fourth group of criteria. When quantitative values of parameters are available the suitability indexes should be given to the certain intervals. For example, the quantitative values for the criterion of the first group "depth of the formation" could be easily obtained from the borehole data and according to the evaluations in various countries suitability of intervals could be determined. The optimum depth in the interval between 500 and 700 meters is evaluated as a very suitable (suitability index 5). The interval from 200 to 500 m – suitable (3), more than 700 m – less suitable (2), not investigated - least suitable (1) and less than 200 m – unsuitable (0).

Lithuanian potentially suitable formations

Geological structure of Lithuania could be suitable for the DGR installation. The territory of Lithuania occurs in the North-eastern part of the East European platform. Crystalline basement occurs at the depth of 200 - 2300 meters below the land surface. The sedimentary cover consists of the deposits of all geological systems. Ediacaran and Cambrian deposits are siliciclastic (claystone, clay, gravelstone, sandstone, siltstone), Ordovician and Silurian deposits are carbonate and clayey (limestone, marl, dolomitic marl, dolomite, claystone, clay), Devonian deposits are carbonate, sandy and clayey (sandstone, sand, clay, dolomitic marl, dolomite, etc.), Carboniferous deposits are sandy and clayey, Permian deposits are represented, in general, by limestone, anhydrite and rock-salt, Triassic deposits are clayey, Jurassic -

clay, siltstone, sandstone, Palaeogene and Neogene - sand, silt, clay and Quaternary deposits are till, sand and gravel.

From hydrogeological point of view the territory of Lithuania belongs to the Baltic artesian basin (BAB) that occurs in the East European platform. The Baltic shield hedges the basin in the North and West. The eastern boundary had been relatively defined near the lakes of Chudo and Pskov towards the centre of Belarussian-Mozurian High. The southern boundary of the basin coincides with the platform edge faults. There are several structural elements, such as Baltic depression, slant of Baltic shield, Belarussian-Mozurian High, defined in BAB. Groundwater of BAB occurs in the sedimentary cover and in the fractured rocks of the crystalline basement. The groundwater forming processes depend on the mentioned structural geological features as well as on the climate conditions, relief and river drainage of the region (Satkūnas et al. 2005).

According to the results of the classic geological investigations which have been stored in the Lithuanian state geological information system, recommendations from IAEA publications and best international practices several geological formations had been evaluated as potentially suitable for DGR installation. Those are: 1) rocks of Crystalline basement, 2) Lower Cambrian clay; 3) Permian evaporites; 4) Lower Triassic clay.

Rocks of Crystalline basement. In Lithuania the Crystalline basement occurs at a depth of 200 - 2300 meters below the land surface and have been represented by Proterozoic rocks: metamorphosed granulite facies in Western Lithuania (gneisses, schists, enderbites, charnokites) and amphibolite facies in Eastern part of Lithuanian territory (amphibolites, gneisses, granites). There are intrusions of basic rocks (gabbro, diabases) in the Crystalline basement rocks. Only rocks of the Eastern and South- Eastern parts of the country had been evaluated as potentially suitable for DGR (Fig. 1) because of the great depth of occurrence (1500 – 2300 meters) in the Western part. Thickness is not an issue for this formation, only about 50 m thick weathered zone could be detected at the upper part. The density of crystalline rocks is high and reaches 2,8 Mg/m^3. The most prospective rock types are represented by cratonic (anorogenic) granitoid intrusions that in some places compose rather large massifs (Kapčiamiestis, Kabeliai). These rocks are the least damaged by tectonic activity. Furthermore, the lithology variations at short distances are only minor that makes exploration much easier. Yet, other rock types (gneisses, mafic intrusions, migmatites) compose someplace only weakly fractured blocks that also may be prospective for a repository. Judging from very low seismic activity, the south Lithuania is

affected by very low tectonic stress. The hydrogeological well tests indicate that tectonic zones are water saturated, whereas homogeneous blocks are water-prove. Salinity of the formation water does not exceed 30 g/1 (except some rare anomalies) which is favourable for engineered barriers. The water flow field of the basement is not well understood as yet.

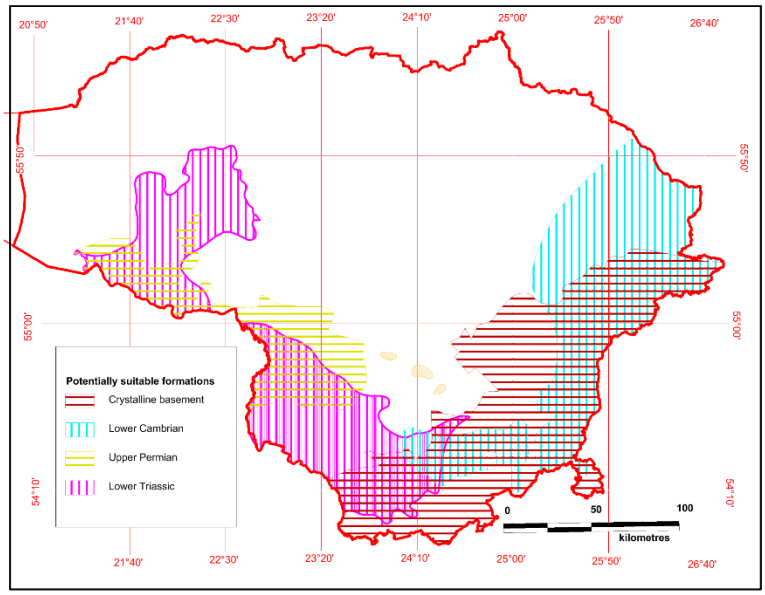


Figure 1. Potentially suitable for DGR geological formations of Lithuania (created by author according to Satkūnas et al., 2005).

Lower Cambrian clay. The oldest part of Lower Cambrian - Baltija group - consists of compact clay formation. This formation occurs in Eastern Lithuania at a depth of 300 - 500 and more meters. Clay is very compact and consists of illite (from 60 - 65 to 85 - 90%), kaolinite (from 3 - 5 to 25 - 30%) and chlorite (from 3 - 5 to 10 - 15%) minerals. There are some interlayers of sandstone in Lower Cambrian clay (Marcinkevičius rt al., 1995). The local sandstone lenses vary from 2 to 9 m of thickness in the central part of the area of distribution of the Lower Cambrian clayey formation, while two considerable sandstone layers in the lower portion of the section (10-16 m of thickness, increasing up to 25 m in the very frontier area in the East) could be traced all along the cross-sections. The sandstone interlayers are potentially highly permeable transport pathways; in such a case the clay barrier thickness would be about 40 m. The Lower Cambrian Clayey Formation is rather poorly

investigated only data of more than 100 wells are available. Sediments are also rather poorly studied in terms of mechanical properties and only few parameters are available (density of the rock equals to 2.22-2.25 g/cm^3, magnetic susceptibility is 0.08-0.14 $\gamma*10^{-3}$).

Permian evaporites. Entire layer of anhydrite is 40 - 60 m thick and occurs in Southern and South-western part of Lithuania at the area of more than 12 000 km2. This layer lies at a depth of 150 - 790 m. Most part of these deposits (70 - 80%) consists of anhydrite. Permian gypsum of 5 - 8 m thick occurs above the anhydrite layer and gypsum of 3 - 5 m thick lies below the anhydrite. Ihe exploration of anhydrite had been carried out in Kaunas district Pagiriai site. Resources of 81.5 mln. tones of anhydrite are evaluated there. The project for the exploitation of anhydrite by underground mining has been prepared. According to this project, the free underground cavities after the exploitation of anhydrite could be used for the DGR construction (Kadūnas 1993). On the other hand, such a concept seems to be ruled out because of the possible human intrusion in the future.

Permian rock-salt basin comprises almost the whole Kaliningrad region (Russian Federation). Only the Northern edge of this basin is detected in south-western part of Lithuania. This territory has been investigated by seismic methods. According to the seismic data salt is expected to occur in the form of single domes. The supposed salt bed was determined using the diagrams of electric log in the oil prospecting boreholes. The prospecting and evaluation of Usėnai rock-salt deposit had been carried out in Šilutė district. There were two deep boreholes drilled with lifting up of the rocks in Usėnai deposit. According to the drilling and seismic data, the area of the salt dome is 2.5 × 3.0 km. The evaluated thickness of the rock-salt in the central part of the deposit is 56.5 - 69.0 m, and supposed thickness - about 75 m.

Lower Triassic Clay. The Lower Triassic deposits occur in the Western and South-western part of Lithuania at a depth of 250 - 350 m and are more than 200 m thick. In general, the sequence consists of dense clay. The most important compounds of the clay are the minerals of illite and smectite groups. There are many siltstone and some sandstone interlayers in the sequence of Lower Triassic deposits (Kanopienė and Marcinkevičius 2000). The void ratio of claystone is defined as 0.299-0.565, the bulk density of the sediments varies about 1.96-2.29 Mg/m^3, density of solid particles reaches up to 2.65-2.82 Mg/m^3. The index of plasticity of sediments exceeds 0,08 (reaching 0.12-0.29 for the most favourable layers). The maximal moisture content ranges within the limits of 11.2-15.8%, the natural moisture

content – 0,1-0.178, and the permeability attains values of 10^{-11}-10^{-12} m/s (Kanopienė et al., 2004).

Calculation of geological formation suitability score

The first part of final suitability evaluation matrix in the suggested methodology is devoted to the dividing the criteria according to the DGR performance scenarios (Table 1). Significance rank value SR is provided to each group.

After the assigning all the criteria to the groups, weighting of a single criterion within the group should be performed and weighting value W should be provided. This coefficient indicates how important each criterion is relative to the others in the same group. This can be referred to as a weighted evaluation of criteria (Ahlroth et al. 2011, Iwaro et al. 2014). Several methods for such an evaluation have been described in the literature (Odu 2019). The developed methodology proposes using the pairwise comparison method. This is a method in which the importance of each criterion for DGR behavior and DGR system safety is compared with the importance of every other criterion in that group by forming pairs. All criteria are compared with one another, and it is determined how many times one criterion is more important than another (Table 2). Therefore, the number of comparisons also depends on the number of criteria in the group. The total significance of all criteria in a single group is set to 1. The significance rating of each criterion can be understood as a fraction or percentage of the total weight of the criterion group.

Table 2. The example of weighting value determination for the group of four criteria.

Weight of criteria	A	B	C	D
A		B<A (1: 2)	C<A (1: 1,5)	D< A (1: 1,5)
B	A>B (2:1)		C< B (1: 2)	D < B (1: 2)
C	A>C (1,5 : 1)	B > C (2: 1)		D =C (1: 1)
D	A>D (1,5 : 1)	B>D (1,5 : 1)	C = D (1 : 1)	

According to Table 2, the weighting value for each criterion is calculated based on its relative weight compared to the other criteria. All

criteria are expressed in terms of one of them, and the sum of the criteria is set to 1. In the example provided in table 2, the following equations are set up and solved:

$A + 0.5A + 0.66A + 0.66A = 1$; $A = 0.3548$;

$2B + B + 0.5B + 0.5B = 1$; $B = 0.25$;

$1.5C + 2C + C + C = 1$; $C = 0.1818$

$1.5D + 1.5D + D + D$; $D = 0.2$.

To simplify further calculations, the resulting weight values can be rounded. In the example provided in a table 2, A = 0.35, B = 0.25, C = 0.2, and D = 0.2.

At the third step quantitative values or qualitative evaluations of parameters, that characterize the criteria, should be analyzed. The suitability indexes SUI should be provided to the values of parameters or to the qualitative evaluations. Finally, the suitability score SS of the geological formation could be calculated according to the formula

$$SS = \sum_{i=1}^{n} SR_i \times W_i \times SUI_i; \quad (1)$$

where i is the number of each criterion; n is the total quantity of criteria evaluated.

The set of 23 geological criteria used in the matrix is not finite and amendments could be made if there are more data of investigations available. As an example of formula (1) application, using indexes presented in the table 3 and all available data about Lithuanian potentially suitable formations the calculations of suitability score had been performed for Lower Triassic clayey formation Lower Cambrian clayey formation and the formation of crystalline basement. Suitability score of lower Triassic is 31,43, Lower Cambrian - 30,4 and of Crystalline basement – 29,5. That means both clayey formations are more suitable for DGR than the formation of crystalline basement.

Table 3. Matrix for the formation suitability calculation.

Geological factors	SR	Criterion with number	W	Intervals of values or gualitative evaluations and suitability indexes									
				interval	SUI	interval	SUI	interval	SUI	interval	SUI	interval	SUI
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Engineering geological conditions	4	1. Depth, m	0,2	<200	0	No data	1	> 700	2	200 - 500	3	500 - 700	5
		2. Formation thickness, m	0,2	<50	0	No data	1	50 - 70	2	70 - 100	3	> 100	5
		3. Bulk density, Mg/m³	0,2	<1,8	0	No data	1	> 2,6	2	1,8 – 2,2	3	2,2 – 2,6	5
		4. Area of occurrence, km²	0,1	<10	0	No data	1	10 - 50	2	50 - 100	3	> 100,0	5
Tectonic regime	4	5. Velocity of vertical movement of earth crust, mm/year	0,1	> 5,0	0	No data	1	3,0 – 5,0	2	1,0 – 3,0	3	<1,0	5
		6. Distance from the fault, km	0,05	0 – 5,0	0	No data	1	5,0 – 25,0	2	25,0 – 50,0	3	> 50,0	5
		7. Probability of volcanic event, qualitative	0,05	high	0	No data	1	-	-	low	3	very low	5
Mineral resource exploration	4	8. Distance from mineral resource site, km	0,1	0 – 5,0	0	No data	1	5,0 – 25,0	2	25,0 – 50,0	3	> 50,0	5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Hydraulic connection with humans' environment	3	9. Low permeability sediments in the formation cover, %.	0,25			0 - 10	1	No data	2	10 - 50	3	> 50	4
		10. Presence of aquifers, number	0,1			> 3	1	No data	2	1 - 3	3	0	4
		11. Distance from palaeoincisions, km	0,1			0 - 10	1	No data	2	10 - 30	3	> 30,0	4
Movement of groundwater	3	12. Formation permeability, m/s	0,25			$> 10^{-4}$	1	No data	2	10^{-9} - 10^{-4}	3	$<10^{-9}$	4
	3	13. Dirrection of vertical flow, qualitative	0,2			up	1	No data	2	down	3	equal level	4
Radionuclide transfer	3	14. Salinity of groundwater, qualitative	0,05			unsaturated solution	1	No data	2	-	-	saturated solution	4
		15. Solubility of radionuclides, qualitative	0,05			high	1	No data	2	-	-	low	4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Uncertainties due to geological conditions	2	16. Density of fractures, 1/m³	0,3			> 1	1	No data	2	-	-	< 1	3
		17. Number of interlayers	0,3			> 3	1	No data	2			< 3	3
Uncertainties due to climate	2	18. Probability of temperature changes, qualitative	0,05			high	1	No data	2			low	3
		19. Glaciation probability, qualitative	0,05			high	1	No data	2			low	3
Formation changes due to DGR impact	2	20. Possibility of formation weakening, qualitative	0,1			possible	1	No data	2			no possibility	3
		21. Probability of fracturing	0,2			high	1	No data	2			low	3
Improvement of isolating properties	1	22. Fracture self-sealing probability	0,7			No probability or no data	1					probable	2
		23. Presence of minerals of higher sorption capacity	0,3			No probability or no data	1					presented	2

2. Systematization, analysis, and investigations of features, events and processes

Geological and other studies conducted for the purpose of establishing DGR have been carried out in various countries at different times, on different scales, and using various methodologies. The scope and methods of these studies have generally depended on the concept of final waste disposal concept adopted in the respective country. Over the past 50 years, a large amount of individual research results has been accumulated worldwide, but these results have not been systematized, and no unified research methodology or standard program has been developed. At the very end of the 20th century, after many countries decided to construct DGR for long-lived and high-activity radioactive waste, the need arose to analyze and summarize the results of studies conducted in various countries.

The purposes of FEPs systematization are to identify possible behavioral scenarios for the DGR system, to identify information gaps for the evaluation of geological formation suitability and DGR safety. Mentioned scenarios form the basis for the assessment of the DGR long-term safety. Not only long-term safety, but also the feasibility of DGR installation can be evaluated by analyzing certain hypothetical scenarios.

The first FEPs catalogs or lists were compiled by summarizing data and results from individual countries or research projects dedicated to GA installation. They examined FEPs of different geological formations, different DGR concepts, or only certain selected planned DGR sites. The global FEP catalog of clayey rocks (Mazurek et al., 2003) was compiled based on data from completed questionnaires received from various countries. In order to compile a catalog of FEPs that could be used both for analyzing the coverage of FEPs and for planning studies in various countries, a general list of FEPs was structured based on the relevance of the FEPs to DGR safety analysis, their association with specific studies, underground laboratories, or DGR sites, as well as the level of detail of the investigation. Each FEP was described using a standardized questionnaire designed to provide the following information: FEP name; FEP definition; FEP classification; the relevance of the FEP to various clayey rocks; site-specific investigation data; the level of understanding of the FEP; practical application of FEP in safety analysis; links to other FEPs; presence of synthesis or progress analysis; planned further FEP studies; overall FEP assessment; comments; sources of information.

The global FEP list of clayey rocks (Mazurek et al., 2003) consists of 59 FEPs which were divided into 5 groups based on scientific understanding, research depth, and importance for analyzing DGR behavior. The groups were

identified and characterized based on the completed FEP questionnaires and reflect the situation in the countries that participated in the survey. This classification can be considered as a guideline for assessing the research status of the FEP, but should not be accepted as a universal global classification or standard.

The mentioned FEP list is just one of many lists compiled around the world. Drawing on global experience, NEA has initiated the development of a universal FEP list that is independent of rock type, study location, or the progress of research. Several versions of this list have been published. It is called the International FEP catalogue and is continuously updated as research methods and systematization technologies evolve. Currently, the NEA publishes version 3.1 of the International FEP catalogue and database, which is accessible and can be used online (https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_19906).

Preparing the dissertation the evaluation of Lithuanian potential geological formations suitability was carried out according to the created methodology. The results of the evaluation showed that the highest suitability for DGR installation is characteristic to the clayey formations. That is why the FEPs of clayey formations were analyzed in more detail, and the first global FEP evaluation catalogue was used for the structuring the data on the FEPs in Lithuania.

Analysis of the clayey rock composition

The clayey rock material of the unpreserved core has been changed during the 30 - 50-year period of its storage. It was assumed that rock mineralogy and chemistry could be the features that have not been changed very much. That was a reason to perform the mineralogical and chemical analyses of the core samples.

Summarising previous and recent investigations analysis of mineralogical composition has been performed on two kinds of clay samples. The first one contained the samples of separated clay fraction, and the second one contained the samples of the bulk rock material.

The X- ray diffraction (XRD) analysis of separate clay fraction of Lower Cambrian clay (22 samples from 3 boreholes analysed) was performed during the comprehensive geological mapping at a scale 1: 50 000 in the region of INPP (Marcinkevičius et al. 1995). The results of this analysis show very strong dominance of illite (60 - 95 %) among the clay mineral. The part of kaolinite ranges from 5 to 10 % and sometimes reaches 40 % (2 samples from the largest depth). Several percents of chlorite had been determined in the material of 14 samples. The clay fraction of Lower Triassic clay (26 samples from 3 boreholes tested) has been analysed during the special

scientific study for the characterisation of lower Triassic clay mineralogical composition (Špokauskas 2005). The results of this study show that smectite (montmorilonite) dominates in the clay fraction of Lower Triassic samples and it's part varies from 60 % up to 88 %. The part of illite minerals varies from 7 % to 25 % and chlorite comprises about 10 %.

The XRD analyses of the bulk rock material of Lower Cambrian clay (10 samples from 4 boreholes analysed) were performed during previous investigations at Belgian SCK - CEN center (3 samples) and recently at the Vilnius University institute of Chemistry (7 samples). Together with XRD analysis of the 3 Lower Cambrian samples the cation-exchange capacity (CEC) was measured. It varies from 9 to 12 meq/100 g in Lower Cambrian clay material. Clayey rock material (7 samples) of Lower Triassic was analysed also at Vilnius University. Results of bulk rock material analyses show the dominance of the same clay minerals as of the investigations of separate clay fraction. Smectite group is characteristic to Lower Triassic clay samples and mica with chlorite - to Lower Cambrian ones. The quartz and K-feldspar are the principal non clay minerals in all tested samples, and quite high amount of dolomite is characteristic only to Lower Triassic clay.

In addition to XRD, determination of chemical composition had been performed on the same milled samples (7 of Lower Cambrian and 7 of Lower Triassic). The method of Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) had been used to determine chemical elements in the samples. The method is based on a principal that each element has a characteristic atomic structure. During the analysis focused beam of high-energy electrons from an instrument like a scanning electron microscope (SEM) that strikes the sample. As a consequence, the atoms in the material emit characteristic X-rays. The EDS detector sorts the X-rays by energy, creating a spectrum and specific software calculates and provides the elemental composition of the sample. The EDS analysis had been performed at the 3 points of each sample that means 21 measurements of each clayey formation.

The EDS analysis showed a similar content of elements that form the clay minerals - carbon, silica and aluminium (C, Si, Al). The difference was noticed in magnesium (Mg) and calcium (Ca). The higher content of these elements reaching 6,84 % of Mg and 5,84 % of Ca in Lower Triassic clay might be caused by fluid migration from the dolomite layers. However, it is impossible to assign elements to the certain minerals because of unknown natural state of the samples.

Plasticity

The characteristic properties of clay (plasticity, cohesiveness) are caused by particles smaller than 0.002 mm (clayey substance). When

examined under a microscope, their crystalline structure can be observed. Clays of lower purity, especially more plastic ones, contain very fine, shapeless particles formed from disintegrated crystals. Each particle of the plastic clay is covered by water film. When the clay is drying it loses the plasticity. Many physical and mechanic properties of clayey rocks depend on the natural water content. Nevertheless, the plastic and liquid limits could be determined using the old core samples. In addition to previously performed tests of Lower Triassic clay, recently determination of the Atterberg limits had been carried out on 7 samples of Lower Cambrian clay core. The tests performed in LGT laboratory according to the standard LST CEN ISO/ TS 17892: 2018. The liquid limit (w_L) had been determined using a method of cone penetration at 4 points. Mass of the cone was 80 g and the angle of the cone apex was 30°. The plastic limit (w_P) had been determined by rolling method. The result of Lower Cambrian samples testing are quite similar to the ones of Lower Triassic.

Particle surface area

The determination of the specific particle surface area had been performed at the Vilnius University institute of chemistry using the BET analyser by Micromeritics Instrument Corporation "TriStar II 3020 V1.03". BET is an abbreviation of the scientists Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett, and Edward Teller names. BET theory applies to systems of multilayer adsorption that usually utilizes a probing gas (called the adsorbate) that does not react chemically with the adsorptive (the material upon which the gas attaches to) to quantify specific surface area. Nitrogen is the most commonly employed gaseous adsorbate for probing surface and had been used for the current measurements. The gas temperature was -195,850 oC and saturation pressure during the measurements was about 101,3 kPa. The same samples of the clayey rock core as for the EDS analysis had been used. The specific surface area of the particles had been measured in 3 samples of Lower Cambrian clay and 3 samples of Lower Triassic clay (Table 4).

Table 4. Summarised results of specific surface area measurements.

No	Sample name	Geological index	Specific surface area, m^2/g
1	Juc 1-10/1	T_1	54,80
2	Pag 6-16/3	T_1	30,88
3	Juc 1-20/6	T_1	46,32
4	Sched 3-12/16	$Є_1$	30,6
5	Nav 1-3/20	$Є_1$	32,74
6	Vis 5-10/21	$Є_1$	28,04

The specific surface area of the particles in the material is an important feature for DGR safety because of its strong relation with the sorption capacity. A larger particle surface area means there are more active sites available for a substance to be adsorbed or absorbed onto, leading to a higher sorption capacity.

Summary of the suitability of geological conditions in Lithuania for the installation of DGR

In Lithuania, the legislation governing the installation of DGR (VATESI, 2016; VATESI, 2017) specifies which types of waste must be disposed of in it; the Development Program outlines the main components of a DGR installation project, but the process of selecting the geological environment and site is not regulated. Geological studies related to the selection of a DGR site are based on the analysis of existing data in Lithuania. The first chapter of the dissertation analyzes both international and Lithuanian regulations governing DGR installation, as well as examples of international best practices in implementing DGR projects. A review of previously conducted geological surveys is provided.

In the course of this doctoral study, a new methodology was developed for assessing the suitability of potential geological formations for the installation of DGR. The methodology is based on 23 suitability criteria of varying importance. According to the developed methodology, the assessment of potential formations is carried out based on the principles of systematic analysis and multi-criteria evaluation. The established suitability criteria describe the composition of potential geological formations, conditions of their occurrence and the properties most significant for DGR safety. Using the developed methodology, the suitability of three potential geological formations in Lithuania for DGR installation has been assessed. The Lower Triassic potential formation received a score of 31.43, the Lower Cambrian – 30.4, and the crystalline basement – 29.5. The developed methodology could be applied in the site selection process for DGR installation in Lithuania. Following an analysis of existing geological data, the methodology could also be applied to assess the suitability of potential geological formations for DGR in other countries.

An assessment of the suitability of potential geological formations, conducted according to the developed methodology, shows that clayey formations are more suitable for DGR than crystalline rock formations. Therefore, this study systematizes the most important for DGR safety clayey rocks FEPs, analyzes the results of their investigations, and identifies data gaps. To quantitatively compare the suitability for DGR of clayey geological formations, laboratory tests were conducted on core samples from several previously drilled wells. The results of these tests cannot be used in the DGR

safety assessment process due to the condition of the rock cores (influence of moisture, temperature, oxidation, and other processes), but they could be used as supplementary criteria or suitability indicators for comparing rock suitability. After comparing the results of laboratory tests on rocks from potential geological formations of the Lower Triassic and Lower Cambrian, it can be concluded that, due to the content of montmorillonite and the larger particle surface area, the Lower Triassic clayey formation exhibits relatively greater suitability for DGR installation than the Lower Cambrian formation.

CONCLUSIONS

1. Based on an analysis of regulations governing the disposal of high-level radioactive waste in Lithuania and other countries, it can be concluded that most countries have established procedures for the disposal of high- and intermediate-level long-lived radioactive waste in geological repositories. However, the process of selecting sites and geological environments for geological repositories is not strictly regulated. This process depends on the countries' traditions in geological science, the adoption of global best practices, and the timely adoption of political decisions. The DGR siting process should be regulated according to the best international practice and the suitability of geological environment in Lithuania.

2. Based on the accumulated data on Lithuania's geological conditions, global practices in the installation of DGR, and the application of the principles of systematic analysis and the multi-criteria analysis method, a methodology was developed to assess the suitability of geological formations for the installation of DGR. The application of this methodology makes it possible to select the most suitable geological environment for DGR installation in Lithuania and to optimize geological surveys in the DGR site selection process.

3. Using the developed methodology for assessing the suitability of potential geological formations and geological data collected in Lithuania, this dissertation evaluated the suitability of Lower Triassic (T_1) clayey formation, Lower Cambrian ($Є_1$) clayey formation, and the formation of crystalline basement for the installation of DGR in Lithuania.

4. Following an analysis of the key features, events and processes (FEPs) of potential clayey geological formations, as well as laboratory tests of unpreserved core samples from previously drilled wells on a limited scale, it was determined that the potential geological formation of Lower Triassic (T_1) clayey rocks is characterized by a mineralogical composition more favorable for GA safety and a larger surface area of clayey rock particles,

resulting in more favorable sorption properties than the potential geological formation of the Lower Cambrian ($Є_1$) clayey rocks.

GYVENIMO APRAŠYMAS

Disertacijos autorė gimė Šiauliuose. 1988 m. sidabro medaliu baigė Šiaulių J. Janonio vidurinę mokyklą ir įstojo į Vilniaus Universiteto Gamtos mokslų fakulteto hidrogeologijos ir inžinerinės geologijos studijų programą, kurią baigė 1994 metais apgynusi diplominį darbą "Klaipėdos miesto moreninių priemolių geotechninių parametrų koreliacinė ir klasterinė analizė".

Nuo 1994 metų pradėjo dirbti geologe Lietuvos geologijos tarnyboje prie Aplinkos ministerijos. Darbinės veiklos pradžioje dalyvavo kompleksinio geologinio kartografavimo M 1: 50 000 projektuose (Molėtų, Drūkšių, Šilutės, Tetirvinų plotai) ir sudarė ekogeologinius šių projektų žemėlapius.

1998-2001 metais parengė apžvalginių tyrimų projektą "Lietuvos teritorijos įvertinimas pagal tinkamumą radioaktyvių atliekų laidojimui", kuriame pirmą kartą Lietuvoje buvo įvardinta būtinybė įrengti giluminį radioaktyviųjų atliekų atliekyną.

Šiuo metu disertantė dirba Lietuvos geologijos tarnyboje Inžinerinės geologijos skyriaus vedėja.

Sukaupusi su radioaktyviųjų atliekų tvarkymu susijusių projektų įgyvendinimo patirtį 2020 metais disertantė įstojo į geologijos mokslo krypties doktorantūrą Vilniaus Universiteto Chemijos ir geomokslų fakulteto hidrogeologijos ir inžinerinės geologijos katedroje.

PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

Moksliniai straipsniai

Kanopienė, R., Gadeikis, S. 2022. Formation selection methodology for deep geological repository in Lithuania. Baltica, 35 (2), 147–155. Vilnius. E-ISSN 1648-858X. Manuscript submitted 25 April 2022 / Accepted 4 October 2022 / Available online 15 November 2022. https://doi.org/10.5200/baltica.2022.2.5

Kanopienė, R., Gadeikis, S. 2024. Geology for Planning and Construction of Deep Geological Repository of Radioactive Waste (Lithuanian Case). In: Barros, J.A.O., Kaklauskas, G., Zavadskas, E.K. (eds) Modern Building Materials, Structures and Techniques. MBMST 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 392. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44603-0_68

Kanopienė, R. 2026. Evaluation of clay formations for the deep geological repository of radioactive wastes in Lithuania. Baltica 39(1), 73–80. Vilnius. ISSN 1648-858X. Manuscript submitted 15 September 2025 / Accepted 7 April 2026 / Available online 8 May 2026. https://doi.org/10.5200/baltica.2026.1.7

Pranešimai mokslinėse konferencijose

Kanopienė, R., Gadeikis, S. 2023. Geology for Planning and Construction of Deep Geological Repository of Radioactive Waste (Lithuanian Case). Modern Building Materials, Structures and Techniques, Vilnius, 2023 m. spalio 5 - 6 d. d.

Vaidotė Jakimavičiūtė-Maselienė, Jurga Lazauskienė, Jolanta Čyžienė, Roma Kanopienė, Rasa Radienė. Site selection procedures at the initial stages of the implementation of DGR programme in Lithuania – lessons learned. International Conference on the Safety of Radioactive Waste Management, Decommissioning, Environmental Protection and Remediation: Ensuring Safety and Enabling Sustainability, Viena, Austrija, 2023-11-06 - 10 d. d.

Kanopienė, R., 2024. Suitability investigations of Lithuanian clay formations for the deep geological repository of radioactive wastes. 9th Clay Conference, Hanoveris, Vokietija, 2024-11-24 - 28 d. d.

Vilniaus universiteto leidykla
Saulėtekio al. 9, III rūmai, LT-10222 Vilnius
El. p. info@leidykla.vu.lt, www.leidykla.vu.lt
bookshop.vu.lt, journals.vu.lt
Tiražas 20 egz.