



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Sutvirtinto šlaito modeliavimas ir grunto stiprumo parametrų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Darius Žurinskas

Projekto autorius

Prof. dr. Viktoras Doroševas

Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Sutvirtinto šlaito modeliavimas ir grunto stiprumo parametrų tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Darius Žurinskas
Projekto autorius

Prof. dr. Viktoras Doroševas
Vadovas

dr. Gediminas Stelmokaitis
Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Darius Žurinskas

Sutvirtinto šlaito modeliavimas ir grunto stiprumo parametrų tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Dariaus Žurinsko, baigiamasis projektas tema „Sutvirtinto šlaito modeliavimas ir grunto stiprumo parametrų tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Žurinskas, Darius. Sutvirtinto šlaito modeliavimas ir grunto stiprumo parametrų tyrimas. Magistro baigiamasis projektas/vadovas Prof. dr. Viktoras Doroševas; Kauno technologijos universitetas, statybos ir architektūros fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: technologijos mokslai, statybos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *Molis, šlakiniai geopolimerai, kerpamasis stiprumas, šlaito stabilumas.*

Kaunas, 2019. 63 p.

SANTRAUKA

Magistrinio darbo tikslas nustatyti molinio grunto su įterptais cilindro formos poliais iš šlakų pagrindo geopolimerų stiprumo parametrų koreliacijas ir ištirti galimybes gautus rezultatus panaudoti šlaito stabilumo modeliavime. Darbas sudarytas iš keturių pagrindinių dalių: literatūros analizės, standartinių ir nestandartinių tyrimų metodikos, molio tyrimų rezultatų analizės ir gautų molio-šlakinių geopolimerų tyrimų rezultatų, šlaito stabilumo rezultatų analizės.

Pirmoje dalyje pateikiama geopolimerų kaip medžiagos samprata, geopolimerų susidarymo proceso esmė, naudojamų medžiagų prigimtis. Nurodomos pagrindinės sąlygos jiems susidaryti, tai pat pateikiamos pagrindinės geopolimerų charakteristikos esant skirtingiems geopolimerų šaltiniams ir aktyvatoriams.

Antroje dalyje nurodomos ir apibūdinamos standartinės ir nestandartinės tyrimų metodikos. Tai pat pateikiamos pagrindinės formulės, kurios naudojamos šlaitų stabilumo analizės metu.

Trečioje dalyje pateikiami molio charakteristikų tyrimo rezultatai bei analizė. Šioje dalyje nustatomos ir pateikiamos atitinkamos molio charakteristikos, kurios naudojamos suformuoti visus molio-šlakinių geopolimerų bandinius.

Ketvirtoje dalyje atliekama molio su šlakiniais geopolimerais kerpamojo stiprio duomenų analizė. Nustatomi priklausomybės ryšiai tarp kerpamojo stiprio ir geopolimerų kiekio molyje. Tai pat su gautais duomenimis atliekama visuminio šlaito stabilumo analizė.

Magistriniame darbe suformuotos keturios išvados.

Darbo apimtis be priedų – **63** psl., kuriuose pateikta **32** paveikslas, **22** lentelių ir **72** literatūros šaltinių.

Žurinskas, Darius. Modeling of reinforced slope and testing a parameters of soil strength. Master's thesis in Civil Engineering / supervisor Prof. dr. Viktoras Doroševas; The Faculty of Civil Engineering and Architecture Kaunas University of Technology.

Research area and field: technology science, civil engineering.

Key words: Clay, slags-based geopolymers, shear strength, slope stability.

Kaunas, 2019. 63 p.

SUMMARY

The aim of master's thesis is to determine shear strength differences between clay and clay with piles of slags-based geopolymers. Master's thesis consists of four main parts: literature review, standard and non-standard research methods, analysis of clay, results and discussion.

The first part is based on scientific articles analysis of geopolymers. This analysis consists of definition of geopolymers, geopolymer precursor design, activating solution for geopolymers and geopolymer as a soil stabilizer.

The master's thesis study methods are presented in the second part. In the description of experimental methods the instruments and testing tools, conduction of experiments are specified. Also, second part presents standards which regulate clay investigation and equations used in software of slope stability analysis.

In the third part the results of clay analysis are presented. The determined quantities of clay are: moisture content in the unit weight of soil, parameter of plasticity. Proctor's and pressure compaction curves are illustrated. In order to determine differences between clay soil and clay with piles of slags-based geopolymer, clay's properties of samples was formed of the records of clay analysis.

In the last part shear strength results of clay and clay with piles of slags-based geopolymers were compared. Also, analysis of shear strength presented most reasonable quantity of slags-based geopolymers in clay. This data was used in the slope stability analysis.

In the master's thesis 4 main conclusions were made.

Thesis consists of **63** pages without additives, containing **32** pictures, **22** tables and **72** references.

TURINYS

1. Aktualumas, suformuluoti magistrinio darbo uždaviniai ir literatūros apžvalga.....	10
1.1. Įžanga	10
1.2. Literatūros apžvalga	11
1.2.1. Geopolimerinės medžiagos	11
1.2.2. Šarminiai aktyvatoriai	19
1.2.3. Gruntų stiprinimas geopolimerais	21
1.2.4. Literatūros apžvalgos apibendrinimas.....	23
2. Pasiruošimas standartiniams ir eksperimentiniams tyrimams, jų metodikos ir organizaciniai veiksmai	24
2.1. Tyrimų metodika	24
2.1.1. Tyrime naudojamos medžiagos	26
2.1.2. Molio drėgnio nustatymas.....	27
2.1.3. Tankio nustatymas	28
2.1.4. Atterbergo ribų nustatymas	30
2.1.5. Proktoro tankio nustatymas.....	33
2.1.6. Tankio nustatymas spūdumo prietaisu	34
2.1.7. Kirpimo bandymai	35
2.1.8. Šlaitų stabilumo analizė kompiuterine programa.....	38
2.1.9. Šlaito stabilumo analizės – padalinimo metodu.....	39
2.1.10. Analizės pavyzdys su išskirstytu krūviu ant šlaito.....	41
3. Tyrimų rezultatai	43
3.1. Suardytos struktūros molio natūralaus drėgnio nustatymas.....	43
3.2. Atterbergo ribų nustatymas	43
3.3. Proktoro tankio nustatymas.....	44
3.4. Tankio nustatymas spūdumo prietaisu	46
4. Gautų rezultatų analizė	48
4.1. Kirpimo bandymas	48
4.2. Šlaitų stabilumo analizė kompiuterine programa.....	56
Išvados	59
Literatūra.....	60
Priedai	64
1 Priedas. Skaičiuojamosios schemos ($H=10\text{ m}$; $\beta=45^\circ$).....	64
2 Priedas. Vertikalių poveikių skaičiavimo rezultatai ($H=10\text{ m}$; $\beta=45^\circ$).....	76

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 PAV. GEOPOLIMERIZACIJOS REAKCIJA	11
2 PAV. GEOPOLIMERIZACIJOS PRINCIPINĖ SCHEMA	12
3 PAV. LAKIŲJŲ PELENŲ TRIMATĖ PSEUDO SUDĖTIES DIAGRAMA, KURIOJE NURODOMOS APYTIKRĖS STIPRUMO RIBOS PRODUKTAI, KURIE AKTYVUOJAMI ŠARMAIS. ŠARMINIAI IR ŠARMINIAI ŽEMIŲ OKSIDAI SUSUMUOJAMI IR PATEIKIAMI KAIP BENDRAS ATITINKAMŲ KATIJONŲ SKAIČIUS. SUDĖTIES IR STIPRUMO DUOMENYS YRA ATRINKTI IŠ LITERATŪRA ŠALTINIO[28]. PALYGINIMUI TAIP PAT PATEIKTA AUKŠTAKROSNĪ ŠLAKŲ SUDĖTIS[29].....	18
4 PAV. NaOH TIRPUMAS % VANDENYJE, KINTANT TEMPERATŪRAI KURT AND.....	20
5 PAV. TYRIMŲ METODAI.....	24
6 PAV. NATŪRALIOS STRUKTŪROS MOLIO MONOLITAS	26
7 PAV. MOLINIO GRUNTO MILTELIAI.....	26
8 PAV. ELEKTRONINĖS SVARSTYKLĖS GF - 1200.....	28
9 PAV. ELEKTRINĖ DŽIOVINIMO KROSNELĖ.....	28
10 PAV. GRUNTO BŪSENA PAGAL ATTERBERGO RIBAS [69]	30
11 PAV. PLASTIŠKUMO DRĖGNIO GRUNTO VOLELIS	31
12 PAV. TAKUMO DRĖGNIO NUSTATYMO PRIETAISAS	32
13 PAV. PROKTORO TANKIO NUSTATYMO PRIETAISAS	33
14 PAV. PATANKINTAS MOLIS CILINDRINIUOSE ŽIEDUOSE	35
15 PAV. PAVYZDŽIAI SPŪDUMO APARATE.....	35
16 PAV. GRUNTO KERPAMOJO STIPRIO GRAFIKAS PAGAL MORO – KULONO TEORIJA	36
17 PAV. VANDENIU PRISOTINTO GRUNTO KERPAMOJO STIPRIO GRAFIKAS	37
18 PAV. KIRPIMO APARATAS	37
19 PAV. MOLIO BANDINIŲ TIPAI.....	38
20 PAV. MOLIO BANDINIŲ TIPAI SU ĮTERPTAIS ŠLAKINIAIS GEOPOLIMERAIS	38
21 PAV. ŠLAITO SLUOKSNIO SLINKIMAS	39
22 PAV. APSKRITIMINIS ŠLAITO SLINKIMAS	39
23 PAV. STABILUMO ANALIZĖ PADALINIMO METODU: A) BANDOMASIS IRIMO PAVIRŠIUS; B) VEIKIANČIOS JĖGOS N-AJAME SEGMENTE.....	40
24 PAV. STABILUMO ANALIZĖ PADALINIMO METODAS ŠLAITAMS, KURIUOSE GRUNTAI IŠSIDĖSTĘ SLUOKSNIAI.....	41
25 PAV. STABILUMO ANALIZĖ SKAIČIUOJAMOJI SCHEMA SU IŠSKIRSTYTA APKROVA.....	42
26 PAV. SUMAIŠYTI SKIRTINGO DRĖGNIO MOLIO MILTELIAI	44
27 PAV. PROKTORO KREIVĖ	45

28 PAV. MOLIO DALELIŲ TANKIO PRIKLAUSOMYBĖS NUO ĮTEMPIŲ.....	47
29 PAV. KERPAMOJO STIPRIO KREIVĖ	50
30 PAV. BENDRA BANDINIŲ KERPAMOJO STIPRIO DIAGRAMA	51
31 PAV. GEOPOLIMERŲ OPTIMALAUS KIEKIO NUSTATYMO DIAGRAMOS	54
32 PAV. SKAIČIUOTINIO VARIANTO SCHEMA „MOLIS“.....	56

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 LENTELĖ. AUSTRALIJOS BITUMINIŲ ANGLIŲ KLODUOSE APTINKAMI SILIKATAI [24]	14
2 LENTELĖ. SI IR AL KONCENTRACIJOS IŠTIRPINUS MINERALUS NaOH IR KOH TIRPALUOSE [25].	14
3 LENTELĖ. GEOPOLIMERŲ GNIUŽDOMIEJI STIPRIAI IŠ AL-SI MINERALŲ [25]	16
4 LENTELĖ. MOLIO CHEMINĖ SUDĖTIS, MASĖ % [67].	26
5 LENTELĖ. GEOPOLIMERO SUDĖTIS.	26
6 LENTELĖ. GEOPOLIMERŲ KOMPONENTŲ CHEMINĖ SUDĖTIS, MASĖ % [68].	27
7 LENTELĖ. LST EN ISO 14688-2:2007 PATEIKIAMAS DULKIŲ IR MOLIŲ KLASIFIKAVIMAS PAGAL KONSISTENCIJOS RODIKLĮ.	33
8 LENTELĖ. SUARDYTOS STRUKTŪROS MOLIO NATŪRALAUS DRĖGNIO NUSTATYMAS.	43
9 LENTELĖ. PLASTIŠKUMO RIBOS BANDYMŲ REZULTATAI.	43
10 LENTELĖ. TAKUMO RIBOS BANDYMŲ REZULTATAI.	43
11 LENTELĖ. PROKTORO BANDYMO REZULTATAI.	45
12 LENTELĖ. TANKINIMO REZULTATAI SPŪDUMO PRIETAISU.	46
13 LENTELĖ. PAKARTOTINIAI TANKINIMO REZULTATAI SPŪDUMO PRIETAISU SU 650 kPa APKROVA.	47
14 LENTELĖ. KERPAMŲJŲ BANDINIŲ SUDĖTIS.	48
15 LENTELĖ. MOLIO KIRPIMO BANDYMO REZULTATAI.	48
16 LENTELĖ. SUSISTEMINTI SANKIBOS IR VIDINĖS TRINTIES KAMPO REZULTATAI.	51
17 LENTELĖ. KIRPIMO BANDYMŲ DUOMENŲ ANALIZĖS REZULTATAI.	53
18 LENTELĖ. OPTIMALAUS KIEKIO NUSTATYMO FUNKCIJOS.	55
19 LENTELĖ. STABILUMO ANALIZĖS VARIANTŲ PAVADINIMAI SU APRAŠYMAIS.	57
20 LENTELĖ. SKAIČIUOTINIŲ VARIANTŲ SCHEMŲ ĮVESTIES PARAMETRAI.	57
21 LENTELĖ. STABILUMO ANALIZĖS REZULTATAI.	58
22 LENTELĖ. STABILUMO ANALIZĖS VEIKSNIO F_s PALYGINIMAS.	58

1. AKTUALUMAS, SUFORMULUOTI MAGISTRINIO DARBO UŽDAVINIAI IR LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Įžanga

Geopolimerai pasaulyje jau yra tiriama apie 50 metų [1]. Nors duomenų yra surinkta nemažai, tačiau vis dar jaučiamas žinių trūkumas tam tikrose srityse. Mokslinėje literatūroje jau yra priimtas faktas, kad geopolimerai ypač tinka stiprinti molinį gruntą ir pagerina molinių gruntų savybes, bet vis dar nėra pakankamai ištirtos grunto ir molio sąveikos savybės, naudojant geopolimerus įvairiomis konfigūracijomis.

Taip pat Australijos mokslininkų atliktoje palyginamoje analizėje [2] pastebėta, kad geopolimerų betonų lyginant su portlancementinių betonų kaina gali būti 7% mažesnės arba didesnės iki 39%. Be viso šito, geopolimeriniai betonai Australijoje turi potencialą sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją 44-64% betono gamybos pramonėje. Tačiau tyrimo autoriai išvadose akcentavo, kad šių kriterijų analizė skirtingose geografinėse teritorijose turi būti atliekama atskirai.

Taigi, nustačius molinio grunto su įterptais cilindro formos poliais iš šlakų pagrindo geopolimerų stiprumo parametrų koreliacijas. Panaudojus nustatytus rezultatus šlaito stabilumo modeliavime, bus įvertinamas geopolimerų poveikis šlaito pastovumui ir taip prisidedama prie šiltnamio efektą sukeliančių dujų mažinimo.

Atsižvelgiant į atliktą įvairių šaltinių apžvalgą ir analizę galima patikslinti ir suformuluoti magistro baigiamojo darbo tyrimo objektą, tikslą ir uždavinius tolimesniam darbui.

Tyrimo objektas.

Grunto šlaitas, kurį sudaro molinis gruntas, kuriame įterpti cilindro formos poliai iš šlakų pagrindo geopolimerų.

Tyrimo tikslas.

Nustatyti molinio grunto su įterptais cilindro formos poliais iš šlakų pagrindo geopolimerų stiprumo parametrų koreliacijas ir ištirti galimybes gautus rezultatus panaudoti šlaito stabilumo modeliavime.

Tyrimo uždaviniai.

1. Ištirti ir nustatyti molio, naudojamo tyrime, fizikinius parametrus.
2. Eksperimentiškai sumodeliuoti ir nustatyti molio stiprumo parametrų priklausomybes nuo šlakinių geopolimerų kiekio molyje.
3. Apskaičiuoti molio sustiprinto šlakiniais geopolimerais stiprumo padidėjimą pagal eksperimentinius rezultatus.
4. Nustatyti molio sustiprinto šlakiniais geopolimerais optimizavimo galimybes. Tam tikslui ištirti šlakinių geopolimerų įtaką molio stiprumo parametrams (vidinės trinties kampas ir sankiba).

5. Ištirti ir įvertinti molio sustiprinto šlakiniiais geopolimerais eksperimentinių rezultatų panaudojimo galimybes šlaitų analizės programos „Fides DV-Partner“ aplinkoje.

6. Sumodeliuoti natūralų šlaitą (be geopolimerų) programos „Fides DV-Partner“ aplinkoje ir apskaičiuoti jo stabilumą, bei palyginti stabilumo pokytį, sustiprinus jį geopolimerais.

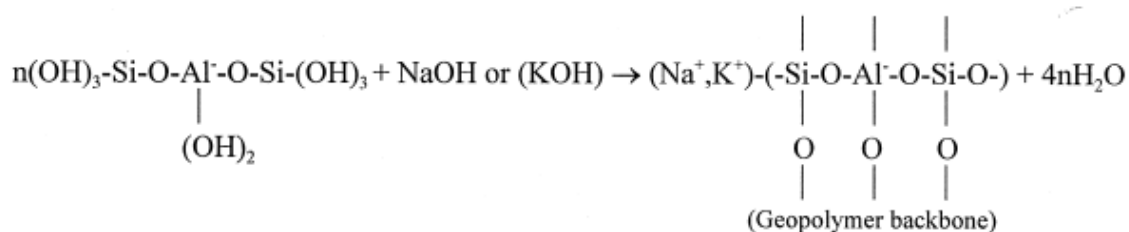
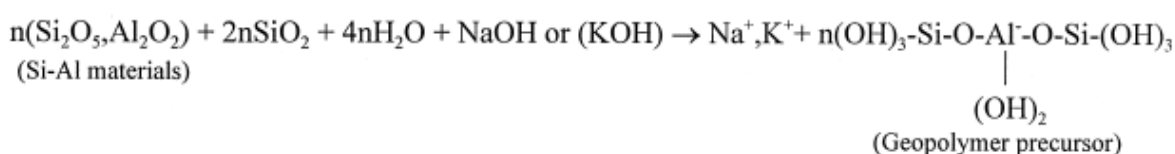
1.2. Literatūros apžvalga

1.2.1. Geopolimerinės medžiagos

1.2.1.1. Geopolimerinių medžiagų cheminė prigimtis

Geopolimerai bendrai apibrėžiami, kaip kieti ir stabilūs aliumosilikatai, kurie susiformuoja, kai yra paveikiami šarmais [3]. Kitų autorių darbuose geopolimerai gali būti vadinami „mineraliniais polimerai“, neorganiniais polimerai“, „neorganiniais polimeriniais stiklais“, „šarmiškai surišta keramika“, „hidrokeramika“ [1].

Mokslininkas Joseph Davidovits vienas iš pirmųjų, kuris atrado aliuminio silikatus, kurie turi pusiau kristalinę gardelę, bet kartu pasižymi amorfinėmis savybėmis. Jis juos pavadino „žemės polimerais“ [4]. Geopolimerai dalyvauja cheminėse reakcijose tarp įvairių aliumosilicātų oksidų, šioms reakcijoms vyksti reikalinga didelio šarmingumo aplinka. Šioje šarminėje aplinkoje geopolimerai sudaro polimerinius ryšius Si-O-Al-O. Šios aprašyto cheminės reakcijos išraiška pateikta 1 pav. Šios dvi reakcijos pateiktos paveiksle parodo, kad viso medžiagos sudaryto iš Si-Al gali būti geopolimerizacijos proceso žaliavomis [5].



1 pav. Geopolimerizacijos reakcija

Geopolimeriniai rišikliai - medžiagos, gautos šarmu aktyvuojant žaliavas, turinčias SiO₂ ir AlO₃, tai gali būti lakieji pelenai, šlakai. Geopolimerai sintetinami panaudojant šarminį tirpalą (aktyvatorių) ir kietus aliumosilikato mineralus (žaliavą). Geopolimerizacija vyksta kambario ar šiek tiek aukštesnėje temperatūroje, kai žaliava (kietos aliumosilikato dalelės) ištirpinamos

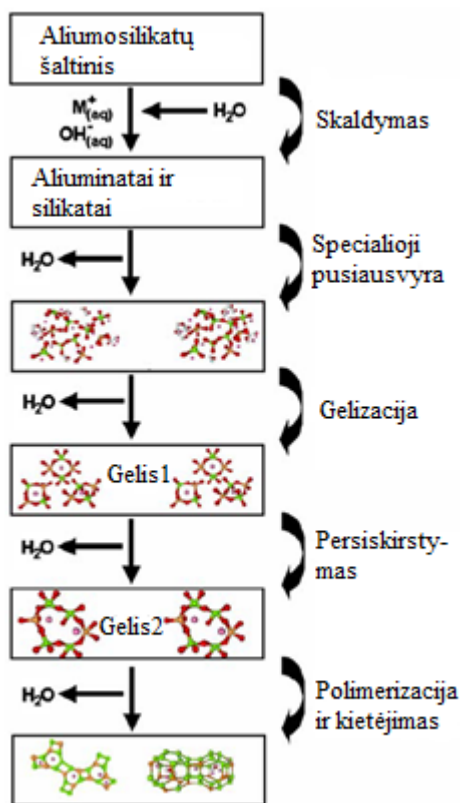
šarminiame tirpale. Reakcijos metu žaliava iš kietosios būsenos pereina į gelinę, kur susiformuoja kieta rišamoji medžiaga [6].

Pagal šaltinį [7] geopolimeriniai rišikliai yra amorfiniai ceolito analogai, kuriems reikalingos panašios hidroterminės sintezės sąlygos. Tačiau amorfinių, pusiau kristalinių gardelės geopolimerų reakcijos trukmė gerokai mažesnė lyginant su kristalizavusios struktūros geopolimeriais rišikliais ir įprastos struktūros ceolitais. Tai pat kituose šaltiniuose [8], [9] nurodoma, kad geopolimerai pasižymi puikiomis mechaninėmis savybėmis, atsparumu karščio poveikiui ir atsparumu rūgštims.

1.2.1.2. Geopolimerizacijos esmė

1950 m. Glukhovskis [10] pasiūlė bendrąjį mechanizmą šarmais aktyvuojamoms medžiagoms, kurių sudėtyje yra silicio dioksidų ir reaktyvių aliuminio oksidų. Glukhovskis šį mechanizmą silicio dioksidams ir reaktyviems aliuminio oksidams suskirstė į tris etapus: (a) suardymas-koaguliacija; (b) koaguliacija-kondensacija; (c) kondensacijos-kristalizacijos. Tačiau kiti autoriai nuodugniau išaiškino ir išplėtė Glukhovskio teorijas, pritaikydami sukauptas žinias apie ceolito sintezę, kurios padėjo geopolimerizacijos procesą paaiškinti kaip visumą [11, 12, 13].

2 pav. pateikta labai supaprastinta geopolimerizacijos reakcijos mechanizmas. Reakcijos mechanizmas 2 pav. parodo pagrindinius procesus, kuriuose kietas aliumosilikatas pavirsta sintetiniu šarminiu aliumosilikatu.



2 pav. Geopolimerizacijos principinė schema

Schema yra supaprastinta, joje nėra nurodyti reikalavimai: medžiagų smulkumas, termininės sąlygos, kintamas aliuminio reaktyvumas ir pan. Reikia atkreipti dėmesį, kad procesai paveikslėlyje pateikti paeiliui, tačiau šie procesai dažniausiai vyksta tuo pačiu metu. Šarmai suskaldžius kietuosius aliumosilikatus (šarminė hidrolizė) gaunamos aluminatų ir silikatų atmainos. Šį procesą aprašančios informacijos kiekis yra toks didelis, kad galima išskirti kaip atskirą mokslo sritį, todėl šiame darbe jis nebus detalizuojamas toliau.[14, 15, 16, 17] Svarbu pažymėti, kad susmulkintų kietųjų dalelių užimamas paviršiaus plotas parodo aluminatų ir silikatų atpalaidavimo laipsnį, kuris atsakingas už kietųjų dalelių transformaciją geopolimerizacijos metu. Ši prielaida turėjo nepaprastai didelės reikšmės aprašant šarminį skaldymą (angl. dissolution), kuris yra pateiktas 2 pav. Nepaisant to, kad kietųjų dalelių perėjimas į gelinį pavidalą nebuvo nustatytas šarminėje aplinkoje geopolimerizacinės sintezės metu.

Kai tirpale išsilaisvinusios dalelės po skaldymo susijungia su vandeniu, susidaro aktyvus silikatinis tirpalas. Šiame tirpale susidaro skirtingi silikatų, aluminatų dariniai, kurių pusiausvyra buvo išnagrinėta literatūroje [18, 19]. Ištirpę amorfiniai aliumosilikatai greitai, esant aukštam pH, todėl greitai susidaro persotintas aliumosilikatų tirpalas. Dėl didelės koncentracijos susidaro gelis. Šio proceso metu išsiskiria vanduo, kuris buvo suvartotas skaldymo metu. Vanduo šio proceso metu atliko tarpininko funkciją, tačiau dalis vandens lieka gelio porose. Tokia gelio struktūra dar vadinama dvifazine, kadangi dalis vandens chemiškai surištas su aliumosilikato rišikliu.

Persotintas aliumosilikato tirpalas pradeda formuoti nuolatinį gelį, kurio savybės priklauso nuo žaliavų apdorojimo, tirpalo sudėties ir sintezės sąlygų [20, 21]. Nepaisant to, kad kai kuriose sistemose niekada nesusidaro gelis. Paprastai tai būna praskiestos sistemos: ištirpusio silicio ir aliuminio koncentracija pernelyg greitai kinta, kad susidarytų sistemos pusiausvyra [20]. Po gelizacijos (angl. gelation) sistema toliau pertvarko ir reorganizuojasi (angl. reorganization), padidėja gelinio tinklo ryšių skaičius- taip susidaro trimatis aliumosilikatų tinklas. Šios gelinės stadijos pavaizduota 2 pav., atsižvelgiant į naujesnius eksperimentinius pastebėjimus [22]. 2 pav. aprašoma aktivizacijos reakcija, kai pasireiškia dvi nuoseklios ir kontroliuojamos stadijos. Kristalizacijos centrų susidarymas, aliumosilikatinių medžiagų tirpumas ar polimerinių darinių formavimas labai priklauso nuo termodinaminių ir kinetinių parametrų – šias dvi nuoseklias ir kontroliuojamas stadijas pasiūlė Glukhovskis. Augimas yra etapas, kurio metu branduoliai pasiekia kritinį dydį ir prasideda vystytis kristalai. Šie struktūrinės reorganizacijos procesai nulemia mikrostruktūrą ir porų pasiskirstymą medžiagoje, kurios ir apsprendžia daugelį fizinių savybių [23].

1.2.1.3. Geopolimerinės medžiagos

1.2.1.3.1. Gamtiniai mineralai

Šaltinyje [24] pateikiami pagrindiniai silikatai, kurie buvo aptikti įvairių autorių Australijos bituminių anglių (angl. bituminous coals) kloduose. Šių mineralų sąrašas pateiktas 1 lentelėje.

1 lentelė. Australijos bituminių anglių kloduose aptinkami silikatai [24]

Pavadinimas	Mineralo cheminis atitikmuo
Koalinitas (angl. Kaolinite)	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{OH}_5(\text{OH})_4$
Ilitas (angl. Illite)	$\text{KAl}_2(\text{Al},\text{Si}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Montmorilonitas (angl. Montmorillonite)	$\text{Na}(\text{Al},\text{Mg})\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Chloritas (angl. Chlorite)	$(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})_6(\text{Al},\text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
Tarpinių sluoksnių molio mineralai	
Kvarcas (angl. Quartz)	SiO_2
Chalcedonas (angl. Chalcedony)	SiO_2
Lauko špatas (angl. Feldspar)	KAlSi_3O_8

Kito šaltinio autoriai [25] ištyrinėjo 16 mineralų, kurie yra tinkami geopolimerizacijai. Šiame šaltinyje pateikti duomenys apie Al ir Si koncentracija po 5 h tirpinimo 20 ml NaOH ir KOH tirpaluose. Šarminiai NaOH ir KOH tirpalai tyrime parinkti skirtingų koncentracijų: 2, 5 ir 10 N. Dedamas mineralų kiekis į tirpalus buvo 0,5 g. Gautos Si ir Al koncentracijos pateiktos 2 lentelėje.

2 lentelė. Si ir Al koncentracijos ištirpinus mineralus NaOH ir KOH tirpaluose [25]

Mine- ralai	2 N NaOH		2N KOH		5 N NaOH		5N KOH		10 N NaOH		10NKOH	
	Si (ppm)	Al (ppm)	Si (ppm)	Al (ppm)	Si (ppm)	Al (ppm)	Si (ppm)	Al (ppm)	Si (ppm)	Al (ppm)	Si (ppm)	Al (ppm)
Alman- dinas (angl. Alman- dine)	59.2	39.6	62.3	39.8	51	34.2	59	36	69.5	44.75	65	41.75
Grosu- las (angl. Gros- sular)	60.6	1.5	50.1	1.82	66	2.02	29	1.4	231	3.05	189.5	3.1
Silima- nitas (angl. Silli- manite)	21.1	27.4	17	23.4	23.4	28.4	23.4	26.4	33.75	33.8	39.85	34.65
Anda- lusitas (angl.	31.5	33.3	30.2	32.6	31.2	33.2	34	33.6	42.5	43.75	37.05	39.25

Mine- ralai	2 N NaOH		2N KOH		5 N NaOH		5N KOH		10 N NaOH		10NKOH	
	Si (ppm)	Al (ppm)	Si (ppm)	Al (ppm)	Si (ppm)	Al (ppm)	Si (ppm)	Al (ppm)	Si (ppm)	Al (ppm)	Si (ppm)	Al (ppm)
Anda- lusite)												
Kiani- tas (angl. Kyani- te)	22.6	20.9	21.1	20.3	26.4	24.4	24.8	21.6	32.5	30.2	29.85	28.15
Pumpe- litas (angl. Pumpe- llyite)	30.6	14.9	31.1	14.5	19.8	11	29.4	13.68	41.3	20.85	38	18.75
Spodu- menas (angl. Spodu- mene)	34.2	20.2	29.6	17.5	39.4	23.2	36.4	19.8	54	31.95	45.45	25.75
Augitas (angl. Augite)	59.3	19.8	53.1	20.9	164.8	74.4	83.4	38	215.5	133	236.5	135.5
Lepi- dolitas (angl. Lepi- dolite)	36.8	25.1	32.5	22.5	34.4	24.4	37	24.2	42.2	29.35	37.25	27
Ilitas (angl. Illite)	42.2	19.8	42	15.8	52	23.4	47	16.56	76	30.6	72.5	29
Celsia- nas (angl. Celsian)	78	62.7	65.8	56.6	78.8	68.2	81.4	63.8	157.5	121	119	97
Sodali- tas (angl. Sodali- te)	68.5	13.6	82.1	38	101	37.2	141.2	41.2	78	88.5	301	246
Hi- droksi- pofili- tas (ag. Hydro- xyapo- phyllite)	58.4	1.28	49.7	1.42	135	2.3	40.8	1.02	140	1.5	107.5	3
Stilbitas (angl. Stilbite)	116	45.9	98.7	32.9	122.8	44.4	124	44	615	201.5	491	165
Heu- landitas (angl. Heu- landite)	127	45.8	94.8	35	141.4	51.6	75	28.4	293	105	216	82.5
Anor- chitas (angl. Anor- thite)	86.2	36.2	69.5	29	79.6	36.6	71.2	30	156	73	131	61.5

Pastebėta, kad mineralų tirpumas didėja padidėjus tirpalų koncentracijai. Didesnis mineralų kiekis ištirpo NaOH tirpale, lyginant su KOH tirpalo koncentracijų duomenimis, išskyrus Sodalitą (angl. Sodalite). Tai pat nustatytas koreliacinis ryšys tarp Al ir Si tirpimo laipsnių, kuris lygus 0,93. Todėl galima teigti, kad Si ir Al sinchronizuotai atskyla šarminėje aplinkoje, kas reikštų, kad Si ir Al gali atskilti nuo mineralų paviršiaus kai kuriuose sujungtose formose.

Be to, [25] šaltinio autoriai nustatė, prieš tai minėtų, geopolimerų gniuždomuosius stiprius iš Al-Si mineralų. Šie duomenys pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Geopolimerų gniuždomieji stipriai iš Al-Si mineralų [25]

Mineralai	Gniuždomasis stipris (MPa)	Gniuždomasis stipris (MPa)
Šarmai	KOH	NaOH
Almandinas (angl. Almandine)	10.3	8.5
Grosulas (angl. Grossular)	16.7	14.5
Silimanitas (angl. Sillimanite)	12.7	6.5
Andalusitas (angl. Andalusite)	11.1	8.8
Kianitas (angl. Kyanite)	6.8	6.3
Pumpelitas (angl. Pumpellyite)	10.8	8.8
Spodumenas (angl. Spodumene)	13.1	5
Augitas (angl. Augite)	6.7	5
Lepidolitas (angl. Lepidolite)	4.3	2.5
Ilitas (angl. Illite)	7.1	5.8
Celsianas (angl. Celsian)	9.7	8.7
Sodalitas (angl. Sodalite)	15	10.3
Stilbitas (angl. Stilbite)	18.9	14.2
Heulanditas (angl. Heulandite)	7.4	5.6
Anorchitas (angl. Anorthite)	14.4	6

Palyginus 2, 3 lentelių duomenis pastebėta, kad kai kurie mineralų pvz. sodalito (angl. Sodalite) ir stilbito (angl. Stilbite), kurių skaldomumas didesnis, pavyzdžiui, po geopolimerizacijos pasiekė didesnę gniuždomąją stiprį lyginant su gautu vidutiniu bandinių gniuždomuoju stipriu. Mineraluose su mažu tirpimo laipsniu, pavyzdžiui, Grosulas (angl. Grossular) ir Silimanitas (angl. Sillimanite), neatsirado tiesioginio ryšio su stipru gniuždomant, o tai atskleidžia geopolimerizacijos reakcijų sudėtingumą. Svarbu pastebėti tai, kad po geopolimerizacijos visuose 15 mineralų pasireiškė didesnis gniuždomasis stipris, geopolimeruose, kurie buvo aktyvuoti KOH, nepaisant to, kad NaOH tirpale mineralų skaldomumas yra didesnis nei KOH tirpale. Kai buvo naudojamas KOH tirpalas, visų mineralų vidutinis gniuždomasis stipris buvo didesnis 11 MPa, t.y. 42% didesnis nei NaOH tirpale.

1.2.1.3.2. Metalurgijos šlakai

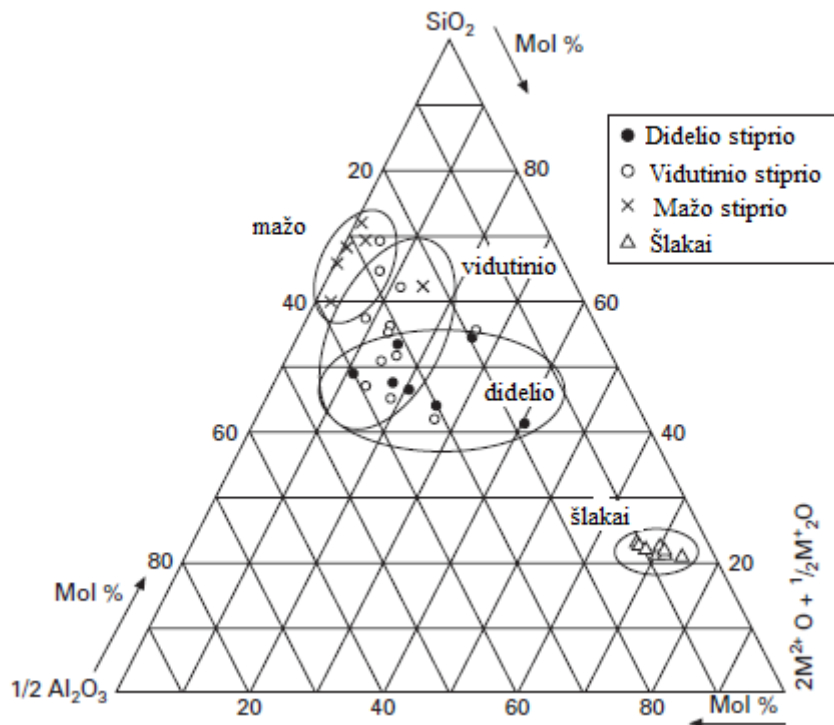
Aukštakrosnių šlakai (sutrumpintai AŠ) plačiau apibūdinami kaip prastai sumaišytų kristalinių fazių mišiniai su sudėtimi, kuri primena gehlenitą (angl. gehlenite, $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) ir akermanitą (angl. akermanite, $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$), taip pat depolimerizuotus kalcio silikatų

stiklus. Depolimerizacijos laipsnis iš esmės kontroliuoja reaktyvumą. Šlakai susidaro esant aukštai temperatūrai kaip skystis aukštakrosnėse, gaminant geležį, vėliau susmulkinamas. Jų sudėtis iš esmės yra pernelyg didelis kiekis pasikeitusios struktūros kalcio aliumosilikatų - t.y., yra daugiau negu pakankamas laisvojo kalcio, kuris pakeičia aliuminio pusiausvyrą, o nepanaudotas aliuminis prisidėti prie stiklo struktūros depolimerizavimo [26]. Apibendrinant geopolimerų sintezę iš šlakinių stiklų: pagrindiniai elementai, kurie nulemia geopolimerų struktūrą yra: katijonai Al^{3+} ir Si^{4+} ; divalenciniai Ca^{2+} ir Mg^{2+} , kurie veikia kaip struktūros modifikatoriai kartu su bet kokiais šarmais.

1.2.1.3.3. Lokieji pelenai

F klasės lokieji pelenai

Lakiųjų pelenų reaktyvumas ir geopolimerinių gaminių prigimtis pagamintų iš lakiųjų pelenų, smarkiai skiriasi, ir tam tikros priežastys išsamiai aptariama knygos [27] 2 skyriuje. Tačiau yra ir papildomų tendencijų, kurias galima pastebėti palyginus pelenų sudėtį ir geopolimerų stiprumo duomenis, kaip parodyta 3 pav. (pateikta pagal [28]). Šiame paveiksle parodytas bendras pelenų oksidų, taip pat pateiktas ir stiprumas, kuris gaunamas aktyvuojant pelenus. Atsižvelgiant į tai, kad duomenys gauti iš įvairių literatūros šaltinių, skirtingų tyrimų grupių, kas reiškia, kad bandiniai suformuluoti skirtingai ir kietėjimo sąlygos galėjo skirtis – tai parodo, kad to pačio stiprumo duomenys nėra tapatūs. Nepaisant to, suskirsčius į kategorijas: „aukšto“, „vidutinio“ arba „mažo“ stiprumo zonas, galima gauti naudingos informacijos. Daugiakomponentiniai sudėties duomenys yra konvertuojami į pseudo trimačius duomenis susumuojant šarminius žemės ($M^{2+}O$) ir šarminius metalo (M_2^+O) oksidus ir pateikiami kaip suma visu pasikeitusių katojonų: šarminis metalo katijonas skaičiuojamas kaip vienas vienetas ir šarminis žemės katijonas kaip du vienetai. Geležis, titanas, likutinis anglis ir kiti elementai nėra įtraukiami į šią supaprastintą analizę, ir sudėtys yra normalizuotos, kad tai atitiktų.



3 pav. Lakiųjų pelenų trimatė pseudo sudėties diagrama, kurioje nurodomos apytikrės stiprumo ribos produktai, kurie aktyvuojami šarmais. Šarminiai ir šarminiai žemių oksidai susumuojami ir pateikiami kaip bendras atitinkamų katijonų skaičius. Sudėties ir stiprumo duomenys yra atrinkti iš literatūra šaltinio[28]. Palyginimui taip pat pateikta aukštakrosnių šlakų sudėtis[29].

Iš 3 pav. aišku, kad pelenai, turintys mažus kiekius struktūros modifikatorių, dažniausiai gaunami mažo stiprio geopolimeriniai gaminiai – F klasė lakiųjų pelenų stiprumas didėja, padidinant struktūros modifikatorių kiekį. Tik iš C klasės lakiųjų pelenų geopolimerinių produktų, gaunamas didelis stiprumas – jie 3 pav. pavaizduoti juodais taškeliai [30]. 3 pav. taip pat pateikti kai kurie tipiniai aukštakrosnių šlakai, kurių sudėtyje yra labai didelis Ca kiekis ir mažas Al kiekis lyginant su dažniausiai pasitaikančiais lakiaisiais pelenais [29]. Tai pat 3 paveiksle pažymėtas „vidutinio“ ir „aukšto“ stiprumo kategorijų plotų persidengimas, kuris parodo, kad stiprumą įtakoja papildomi veiksniai, tokie kaip dalelių dydis, kristališkumas ir kitų elementų kiekis: geležies arba anglies dioksido, kurie buvo neįtraukti į 3 pav. Tačiau didelio stiprio geopolimerai paprastai gaunami iš aukštakrosnių lakiųjų pelenų, kuriuose yra didelis aliuminio oksido kiekis, patenka į prieš tai minėtas kategorijas. O pagal kitus charakteringus taškus, „mažo“ stiprio pelenų zonoje, išvelgta, kad pelenai su dideliu kiekiu struktūros modifikatorių turi mažiausią Al_2O_3 kiekį iš visų pavaizduotų pelenų.

C klasės lakieji pelenai

Stebėta, kad struktūros modifikatorių kiekis yra potencialus rodiklis, apibūdinantis lakiųjų pelenų naudingumą geopolimerizacijai, todėl buvo atkreiptas dėmesys į C klasės (didelio kiekio kalcio) lakiųjų pelenų panaudojimą. Šio klasės pelenai akademinėje literatūroje nebuvo analizuoti taip plačiai kaip F klasės, todėl yra tik keletas publikacijų [30, 31, 32, 33]. Šie šaltiniai ne tik patvirtina, kad C klasės lakiuosius pelenus galima naudoti geopolimeruose, tačiau netgi patvirtina, kad šios klasės lakieji pelenai tinkamesni nei F klasės, jei mišinio reologija tinkamai kontroliuojama. C klasė lakiųjų pelenų struktūrą galima laikyti tarpine tarp klasių F pelenų ir šlakų. Tačiau būtina pažymėti, kad F klasės lakiesiems pelenams ir šlakams teikiamas pirmumas gaminant geopolimerus [34, 35, 36], tačiau šaltiniai ir daugybė staiga užregistruotų patentų, tik patvirtina C klasės lakiųjų potencialą. Visgi, C klasės pelenų resursai ne tokie gausūs kaip F klasės pelenų, todėl būtinas geresnis supratimas apie lakiųjų pelenų vaidmenį stiklo formavimo procesuose, ypač jeigu egzistuoja optimali komponentų sudėtis gaminant geopolimerus.

1.2.2. Šarminiai aktyvatoriai

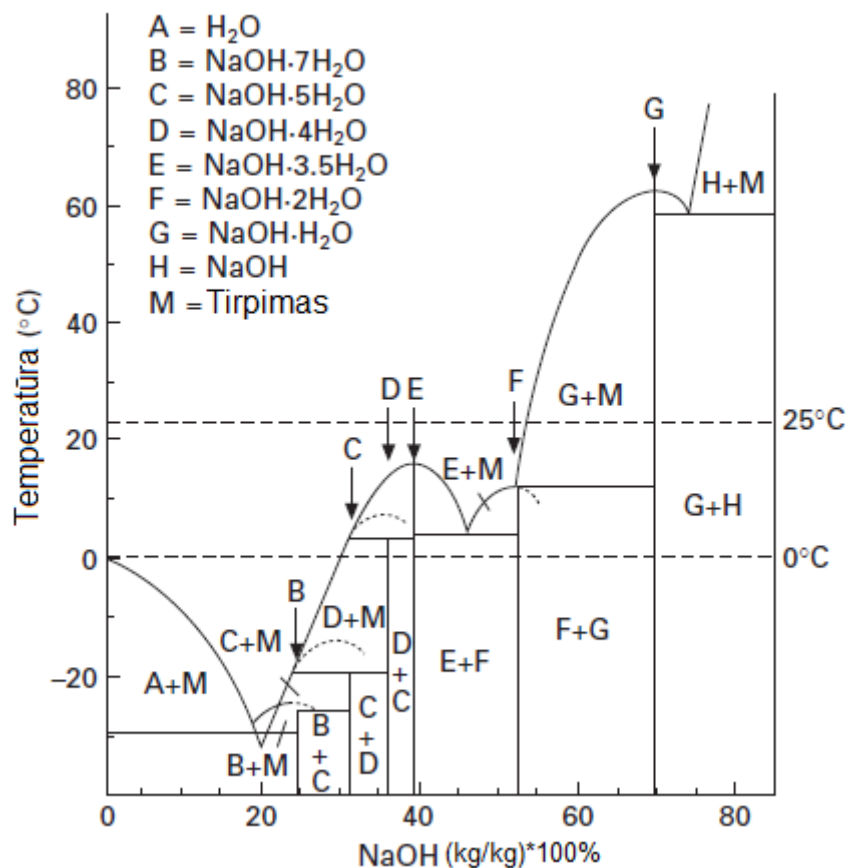
1.2.2.1. Ličio hidroksidas, LiOH

LiOH tirpumas vandens tirpale esant 25 °C temperatūrai yra tik 5,4 mol/kg [37], t.y. apatinė naudingo šarmingumo riba, reikalinga hidroksidiniams aktyvatoriams geopolimerinės sintezės metu. Dauguma šaltinių, kuriose galima rasti apie ličio panaudojimą geopolimerams, yra iš patentų. Šiuose patentuose litiš tai pat panaudojamas kaip polimerizacijos greitiklis [38], arba supaprastintai litiš būtų galima įvardinti kaip plataus panaudojimo šarminio metalo katijoną, kuris geopolimeruose atlieka užpildų struktūros rišiklio funkciją. Todėl laikoma, kad litiš geopolimerams tyrimams yra santykinai mažos svarbos. Pagrindinė „Li⁺“ funkcija cemento ir betono gamybos technologijose yra sumažinti šarminės korozijos (šarminio silicio dioksido) reakcijas esant reaktyviems užpildams [39]. Atsižvelgiant į tai, šio problemos nebuvo pastebėta geopolimeruose [40, 41], taigi reakcijos metu tarp šarminio tirpiklio ir reaktyvių silikatų / aliumosilikatų užpildų numanoma, kad susidarys didesnis kiekis geopolimerinio gelio rišiklio, o ne žalingų produktų. Todėl numatoma, kad litiš netaps toks svarbus geopolimerų gamybai, kaip portlandcemento sistemose.

1.2.2.2. Natrio hidroksidas, NaOH

NaOH tirpalų termodinaminės savybės ištirtos ir detalai sumodeliuotos per pastaruosius keletą dešimtmečių [42, 43, 44]. NaOH yra dažniausiai naudojamas hidroksidinis aktyvatorius geopolimerizacijoje, ir jis yra pigiausias ir labiausiai prieinamas šarminis hidroksidas. NaOH

naudojimas lakiesiems pelenams, metakaolinui, aktyvuoti, ypač paplito dėl nedidelės kainos, didelio prieinamumo ir mažos klampos. Tačiau koncentruotas NaOH arba kitiems šarminiams hidroksidams, kurie pasižymi žymiu ardому poveikiu, reikalinga specializuota įranga pagaminti didelius kiekius hidroksidais aktyvuojamų geopolimerų. Todėl silikatinės kilmės aktyvuotiems produktams (įvairiems cementams) teikiama pirmenybė. NaOH tirpumas 25 °C temperatūroje pagal masę yra 53,3 % (28,57 mol/kg), bet sumažėja daugiau nei 30 % (10,73 mol/kg) esant 0 °C temperatūrai. Kietų NaOH tirpimo proceso tvarka, kai NaOH masė sudaro nuo 30 iki 50 % tirpalo masės ir temperatūra kinta ir 0 ir 25 °C, pateikta 4 pav. [45, 46]. Tai gali būti svarbu, jei koncentruoti aktyvuojantys hidroksido tirpalai naudojami gaminant geopolimerus šalto klimato sąlygomis.



4 pav. NaOH tirpumas % vandenyje, kintant temperatūrai Kurt and Bittner (2006).

Karbonizacija (baltojo natrio karbonato ar bikarbonatų kristalų susidarymas) taip pat yra žinomas reiškinys geopolimeruose, aktyvuojant juos per didelės koncentracijos hidroksido tirpalais, kai šarmų perteklius reaguoja su atmosferiniu CO₂. Tai sukelia estetinius trūkumus, bet ne visada pakenkia medžiagos struktūros vientisumui.

1.2.2.3. Kalio hidroksidas, KOH

KOH tirpumas 25 °C temperatūroje yra apie 21 *mol/kg* ir šis tirpumas taip dramatiškai nesumažėja mažėjant temperatūrai [45]. Tai pat tirpumo fazių diagrama yra žymiai paprastesnė lyginant su NaOH-H₂O sistema, nėra hidrato prisijungimo fazės. Dėl šios priežasties nesusidaro nuosėdos, kurios atsiranda natrio hidroksido aktyvuojančiuose tirpaluose. Tai neturėtų sukelti sunkumų KOH tirpalus panaudoti realiomis sąlygomis, gaminant geopolimerus.

1.2.2.4. Rubidžio hidroksidas, RbOH

Rubidio hidroksidas nėra išsamiai ištirtas geopolimerizacijos procese, daugiausia dėl jo išlaidų ir santykinio trūkumo. Tiesą sakant, informacijos trūkumas apie RbOH elgesį ir savybes patvirtina faktas, kad geriausi turimi termocheminiai duomenys apie šį junginį [47], buvo gautas iš eksperimento duomenų gautų nežinomo grynumo bandinio 1906 m. RbOH tirpumas 15 °C temperatūroje yra 17,6 *mol/kg* arba apie 180 g RbOH 100 ml H₂O [48].

1.2.2.5. Cezio hidroksidas, CsOH

Kai kuriais atvejais geopolimerizacijai naudojamas cezio hidroksidas, bet daugiausia silikatinėse, o ne šarmais aktyvuojamose sistemose. Tai yra mažiau retas elementas nei rubidis, bet vis tiek pakankamai egzotiškas, kad būtų komercelizuotas geopolimerų gamyboje, išskyrus specifinius keramikos gaminius, kuriuose reikalinga didelė šiluminė varža ir labai mažas, aliumosilikatų su dideliu šarminių katijonų kiekiu, šiluminis plėtrumas [49]. CsOH tirpumas vandenyje kambario temperatūroje yra apie 27 *mol/kg* (~ 400 g CsOH / 100 ml H₂O) [50], todėl CsOH susidarančios nuosėdos būtų problemiškos geopolimerinėje sintezėje.

1.2.3. Gruntų stiprinimas geopolimerais

Straipsniuose, techninėse ataskaitose, žurnaluose yra nemažai aprašyta apie gruntų stiprinimo tyrimus, naudojant stabilizatorius (rišiklius), tokius kaip marmurinė dulkė, ryžių luobelė, geopolimerai. Trumpa šių tyrimų apžvalga apie ankstesnius dirvožemio stabilizavimo darbus su skirtingų tipų stabilizatoriais ir jų sudėtimis, jų savybėmis, matmenimis, eksperimentine metodika pateikiama žemiau.

Šaltinyje [51] tirtas mažo plastiškumo molis, kuris stabilizuojamas su metakaolininio pagrindo geopolimerais. Bandiniai suformuoti su skirtingų masių santykiais (svyruoja nuo 3 iki 15 % nestabilizuoto optimalaus drėgnumo grunto masės), siekiant išnagrinėti geopolimerinių stabilizatorių tinkamumą dirvožemiams. Geopolimerais stabilizuoti grunto bandiniai buvo analizuojami stiprio bandymais, tūrio pokyčio matavimais kietėjimo metu, skenuojamąja

elektronine mikroskopija (SEM), energijos dispersinės rentgeno spinduliuotės spektroskopija (EDX) ir rentgeno difrakcija (XRD). Tyrimo rezultatai parodė, kad padidėjus geopolimerinio užpildo koncentracijoms, kirpimo įtempiai ir tamprumo modulis padidėjo, o kietėjant sumažėjo tempimo įtempiai. Mikrostruktūros analizė patvirtino geopolimerinių gelių susidarymą stabilizuotame grunte ir parodė, kad po stabilizavimo grunto mikrostruktūra pasidarė homogeniškesnė ir kompaktiškesnė. Šis tyrimas atskleidė, kad geopolimerai, kurių pagrindą sudaro metakaolinas, gali būti veiksmingas dirvožemio stabilizatorius moliniams gruntams. Šiame tyrimas patvirtino metakaolininio pagrindo geopolimerų panaudojimo galimybes, kaip grunto stabilizatorių mažame gylyje. SEM-EDX ir XRD rezultatai parodė, kad metakolininiai geopolimeriniai (MKG) geliai efektyviai formuojasi moliniame grunte, taip sukurdamos kompaktiškesnę mikrostruktūrą ir pagerindamos grunto mechanines savybes bei tūrio stabilumą. MKG stabilizuotų gruntų stiprio vertės yra žymiai didesnės nei natūralaus. Tačiau stiprio padidėjimas po 7 dienų kietėjimo ir 28 dienų kietėjimo skyrėsi nežymiai – tai galėjo įvykti dėl greitos metakaolininių geopolimerų reakcijos.

Kai kurių mokslininkų sėkmingi tyrimai patvirtino faktą, kad lakiaisiais pelenais galima pagerinti molius gruntus [52, 53, 54, 55], nepaisant kad bandiniai buvo laikomi aukštoje temperatūroje ar kambario temperatūroje ilgą laiką (net iki vieno metų). Naujesniuose tyrimuose [53, 54, 56, 57, 58] nustatyta, kad, pridėdant lakiųjų pelenų, molio grunto stiprumas padidėja. Kampala ir kt. [58] atskleidė, kad optimalus lakiųjų pelenų (LP) kiekis yra apie 20%, o toliau didėjant LP kiekiui grunto stipris buvo beveik pastovus. Tačiau Bose [56] parodė, kad grunto stipris mažėja. Horpibulsuk ir kt. [59] pateikė panašius rezultatus su kalcio karbido liekanų ir LP mišiniu, nedideli skirtumai atsirado dėl kalcio karbido liekanų. Jie taip pat teigė, kad jų mišinys tinkamesnis gruntams stiprinti nei portlandcementis.

Literatūros apie šlakinių geopolimerų veiksmingumą grunto stiprinimui yra palyginti mažai. Tik visai neseniai Yaolin ir kt. [60] ištyrė keletos šarminių aktyvatorių įtaka ir veiksmingumą jūriniam minkštam moliui sumaišytam su šlakais. Priešingai nei lakieji pelenai, šlakų tokios savybės kaip: reikalingas rišiklio kiekis, šarmų ir rišamosios medžiagos santykis ir šarmų stiprumas, kuris įtakos mechaninėms šlakų savybėms, yra ribotai iširtos [61]. Tačiau ankstesni tyrimai rodo, kad molingiems gruntų stipris padidėja, įterpus šlakų [62, 63, 64, 65, 66]. Be to, grunto stiprio vertės gali skirtis atsižvelgiant į šlakuose naudojamo aktyvatoriaus tipą [62, 63]. Palyginus šlakų ir MgO mišinį su portlandcementiniais mišiniais Yi ir kt. [62] buvo nustatyta iki 4 kartų didesnis gniuždomasis stipris po 28 parų.

1.2.4. Literatūros apžvalgos apibendrinimas

Geopolimerai yra labai įdomi mineralinė medžiaga, kuri pasižymi amorfinėmis savybėmis kaip polimerai. Tačiau geopolimerizacijos metu ar po jos, geopolimerų savybės iš amorfinių pasikeičia į pusiau kristalinės ar kristalinės. Nors šio proceso eigos principas yra išnagrinėtas, visgi tarpiniai procesai nėra pilnai ištirti ir išaiškinti.

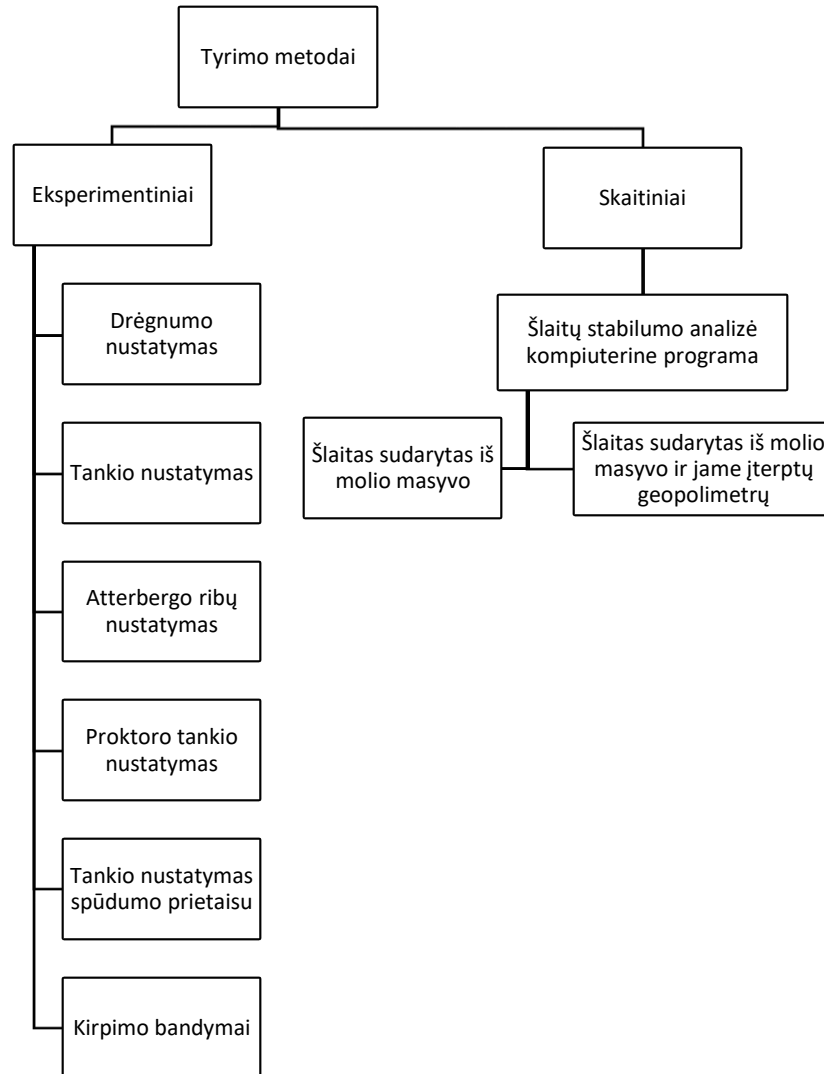
Geopolimerams pagaminti reikalingi trys komponentai: aliumosikalinio pagrindo uolienos ar kitos medžiagos, šarmai ir vanduo. Aliumosikatinio pagrindo medžiagos gali būti išgaunamos iš natūralių gamtoje surandamų uolienu, metalurgijos aukštakrosnių atliekų – šlakų ir degimo atliekų- lakiųjų pelenų. Kitas komponentas šarmai t.y. įvairių tipų hidroksidai, tačiau praktiškai realiomis sąlygomis galima panaudoti, tik NaOH ir KOH, kadangi kitų hidroksidų elementai reti ir sunkiai prieinami arba kitas galima trūkumas – susidaro atitinkamos nuosėdos. Dar viena problema kylanti su šarmais yra susijusių įranga t.y. šarmams gabenti reikalinga specializuota įranga ir apmokytas personalas.

Visuose tyrimuose, kuriuose buvo naudojami geopolimerai, kaip grunto stipriklis, pastebėta, kad padidėja grunto stiprumas ir pagerėja kitos grunto savybės. Žinoma, tyrimų rezultatai skyrėsi dėl aliumosilikų šaltinio ar dėl aktyvuojančios šarmo. Nors jau šiuose tyrimuose yra nustatytas optimalus lakiųjų pelenų pagrindo geopolimerų kiekis grunte (20%), kur geopolimerai buvo maišomi kartu su gruntu. Tačiau reikia pažymėti, kad nėra atlikta tyrimų su šlakiniais geopolimerais, kurie būtų įterpti į molinį gruntą kaip geopolimeriniai poliai.

2. PASIRUOŠIMAS STANDARTINIAMS IR EKSPERIMENTINIAMS TYRIMAMS, JŲ METODIKOS IR ORGANIZACINIAI VEIKSMAI

2.1. Tyrimų metodika

Tyrimai atliekami pagal žemiau pateiktą diagramą.



5 pav. Tyrimų metodai

Kaip matyti iš pateiktos schemos, šiame magistro baigiamajame darbe atliekami dviejų tipų tyrimų metodai: eksperimentiniai ir skaitiniai. Eksperimentinių tyrimų pagrindinis tikslas yra nustatyti molio charakteristikas, jam identifikuoti ir suformuoti bandinius su kuo vienodesnėmis molio savybėmis. Šiam tikslui pasiekti atliekami tokie eksperimentiniai molinio grunto bandymai:

- *Drėgno ir tankio nustatymas.* Pagrindinės molio fizinės savybės yra drėgnis ir tankis, nuo jų tiesiogiai priklauso ir mechaninės savybės, todėl šiuo parametrus svarbu nustatyti ir pagal juos charakterizuoti gautus bandymų. Tyrimai atliekami su suardytos struktūros moliu.

- *Atterbergo ribų nustatymas.* Šie tyrimai reikalingi molio takumo ir plastiškumo drėgniui nustatyti. Atterbergo ribų nustatymas leidžia klasifikuoti molį pagal jo konsistenciją.
- *Proktoro tankio nustatymas.* Šis tyrimas atliekamas siekiant nustatyti optimalų molio drėgnį, kuriam esant molio kietųjų dalelių tankis pasiekia didžiausią reikšmę. Vėliau šio bandymo duomenų pagalba nustatoma konsolidacijos apkrova, norint pasiekti atitinka molio dalelių tankį.
- *Kirpimo bandymai.* Tyrimuose nustatomos pagrindines mechanines molinio grunto savybės: sankiba ir vidinės trinties kampas. Bandymai atliekami su laboratorijoje konsoliduoti moliu ir šiame molyje cilindriškai įterptais šlakiniiais geopolimerais, kurių sudėtis pateikiama sekančioje dalyje. Tyrimai atliekami su optimaliu drėgniu, kuris buvo nustatytas Proktoro bandymo metu, bet bandymų vykdymo eigoje šis drėgnis gali sumažėti keliais procentais, dėl aplinkos poveikio.

Pastaba: visų bandymų metu, visi pavyzdžiai laikomi polietileniniuose maišeliuose, kad drėgnio molis prarastų kuo mažiau.

Skaitiniai tyrimo metodai atliekami šlaitų stabilumą analizuojančia kompiuterine programa. Programos aplinkoje analizė atliekama pagal gautus kirpimo duomenis, kai šlaitas sudarytas iš molio, ir kai molyje yra skirtingas geopolimerų kiekis.

2.1.1. Tyrime naudojamos medžiagos

2.1.1.1. Molis

Tyrimuose naudojama medžiaga – molis iš Kertupio molio karjero. Molinis gruntas pasirinktas, kadangi mokslinėje literatūra pastebėta, kad vis nėra surinkta pakankamai duomenų apie šlakinių geopolimerų ir molio, kaip bendro darinio savybes.

Tyrimė naudojamas suardytos struktūros molis. Pavyzdžiai formuojami iš suardytos struktūros molio miltelių (žr. 14 pav.), kurie gauti sumalus sausą molio monolitą (žr. 6 pav.) iš Kertupio molio karjero, jo cheminė sudėtis pateikta 4 lentelėje. Molio milteliai (7 pav.) gaunami džiovinant natūralios struktūros molį iki pastovios masės. Po to išdžiovintas molio masyvas sumalamas rutuliniu malūnu. Molio milteliai naudojami dėl to, kad palengvina pavyzdžių formavimą ir suteikia galimybės pavyzdžius formuoti skirtingo drėgnumo – tai užtikrinamas pavyzdžių savybių tolygumas.

4 lentelė. Molio cheminė sudėtis, masė % [67].

SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Kaitmenys
47,06	15,98	0,51	5,29	9,31	4,75	3,55	1,16	0,21	12,18



6 pav. Natūralios struktūros molio monolitas



7 pav. Molinio grunto milteliai

2.1.1.2. Šlakiniai geopolimerai

Pavyzdžiai formuojami įterpiant geopolimerus, kurių sudėtis pateikta 5 lentelėje. Geopolimerų komponentų sudėtis pateikta .

5 lentelė. Geopolimero sudėtis.

Geopolimero sudėtis 48 cm ³			
Šlakas	NaOH	Fosfogipsas	H ₂ O
110g	10,8g	1,1g	~30g

6 lentelė. Geopolimerų komponentų cheminė sudėtis, masė % [68].

Komponentas	CaO	SO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	F	ZrO ₂	K ₂ O
Šlakas	45,20	1,85	37,10	6,44	5,76	-	0,02	0,517
Fosfogipsas	39,06	52,71	0,34	0,07	0,21	0,06	-	-

2.1.2. Molio drėgnio nustatymas

Gruntas paprastai apibrėžiamas kaip daugiafazė dispersinė sistema, kuri sudaryta iš kietosios, skystosios ir dujinės fazės. Kietąją komponentę sudaro grunto mineralinės dalelės, skystąją – vanduo, o dujinę komponentę yra grunto porose esantis oras ir vandens garai. Šių trijų komponentių kiekybinis santykis nulemia grunto savybėms, kaip ir jo stiprumą. Grunto drėgnis apibūdina kietosios ir skystosios komponentių santykį. Grunto drėgnis – tai dydis, kuris rodo grunto porose esančio laisvojo vandens ir sausos grunto masių santykį. Gamtinis molio drėgnis kinta nuo 18 – 46 %, tankių priesmėlių ir priemolių drėgnis būna 4 – 29 % [69].

Grunto drėgnis nustatomas laboratoriniu bandymo metodu pavyzdžius džiovinant krosnyje, kuris atliekamas pagal standartą LST 1360.3:1995. Trumpai, grunto drėgnis nustatomas pagal tokią bandymo metodiką:

1. Pasveriami tušti metaliniai pavyzdžių indeliai su elektroninės svarstyklės GF-1200, kurių tikslumas 0,01 g (žr. 8 pav.).

2. Tada gruntas indeliuose pasveriamas.

3. Pavyzdžiai indeliuose įdedami į džiovinimo krosnį ir džiovinami 105 °C temperatūroje. Pavyzdžiai džiovinami, 9 paveiksle pavaizduota, elektrine džiovinimo krosnele Gimette Gima 28. Džiovinimo stadijoje svarbu išlaikyti kuo tikslesnę ir pastovią 105 °C temperatūrą, nes aukštesnėje temperatūroje negu 105 °C iš molio mineralų pradeda išsilaisvinti kristalizacinis (cheminiais ryšiais surištas) vanduo. Molio džiovinimas trunka ne mažiau kaip 12 valandų.

4. Pro džiovinimo pavyzdžiai kartu su indeliai pasveriami, kai šie atvėsta iki kambario temperatūros.



8 pav. Elektroninės svarstyklės GF - 1200



9 pav. Elektrinė džiovimo krosnelė

Grunto drėgnis apskaičiuojamas pagal formulę:

(1)

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \cdot 100\%;$$

čia:

W -tiriamo grunto drėgnis;

m_1 -indelio su drėgnu gruntu masė, g;

m_2 -indelio su sausu gruntu masė, g;

m_0 -tuščio indelio masė, g.

2.1.3. Tankio nustatymas

Grunto tankis – vienas iš pagrindinių rodiklių, nusakančių jo fizinę būklę. Gruntas yra daugiafazė sistema, todėl jo tankį apibūdina ne vienas rodiklis, todėl išskiriami tokie grunto tankio rodikliai:

- *Kietųjų dalelių tankis.* Tai yra grunto kietųjų dalelių masės santykis su jų tūriu. Šis grunto tankis nustatomas piknometru ir šis tankis priklauso nuo dalelių mineralinės sudėties. Moreninio molio kietųjų dalelių tankis apytikriai $2,71 - 2,72 \text{ g/cm}^3$, limnoglacialinio molio kietųjų dalelių tankis $2,73 \text{ g/cm}^3$ [70].
- *Sauso grunto tankis.* Šis rodiklis priklauso tik nuo grunto poringumo. Sauso grunto tankis yra kietųjų dalelių masės santykis su viso grunto tūriu. Šio rodiklio fizinė prasmė yra sauso grunto vienetinio tūrio masė.
- *Atsverto grunto tankis.* Šis rodiklis apibūdina grunto tankį vandenyje. Vandenyje gruntas yra veikiamas Archimedo jėgos, todėl jo tankis yra mažesnis. Atsverto grunto tankis priklauso nuo kietųjų dalelių tankio ir poringumo koeficiento.
- *Svorio tankis (vienetinis svoris).* Šis rodiklis naudojamas skaičiuojant apkrovą, kuria gruntas veikia tam tikrą po juo esantį elementą. Svorio tankis yra lygus natūralaus grunto tankio ir laisvojo kritimo pagreičio sandaugai.

Dažniausiai naudojamas tankio rodiklis vadinamas *natūraliuoju grunto tankiu*, arba supaprastintai tiesiog *grunto tankiu*. Grunto tankis, žymimas simboliu ρ , parodo natūralaus drėgnio grunto tūrio vieneto masę ir yra skaičiuojamas pagal 2.2 formulę:

(2)

$$\rho = \frac{m}{V};$$

čia:

ρ - grunto tankis;

m - natūralaus drėgnio grunto pavyzdžio masė, g ;

V - grunto pavyzdžio tūris, cm^3 .

Grunto tankio laboratorijoje nustatymas žiedo metodu pagal LST 1360.6:1995 standarte pateiktą metodiką. Šis būdas naudojamas natūralios struktūros grunto tankiui nustatyti. Grunto pavyzdys paimamas specialiu metaliniu žiedu, kurio pagrindiniai matmenys yra žinomi: vidinis skersmuo – 71,4 mm , skerspjūvio plotas – 40 cm^2 , žiedo aukštis – 35 mm , tūris – 138 cm^3 .

Pirmiausia visas žiedas pasveriamas svarstyklėmis, kurių tikslumas 0,01 g . Tada žiedas nukreipiamas aštria briauna į molio paviršių ir kaip galima centruočiau, plaktuku per medinę lentutę įkalamas tiek, kad virš viršutinio žiedo krašto paviršiaus molio paviršiaus plokštuma būtų apie 10 mm aukščiau. Po žiedo išpaudo į gruntą, vienas žiedo šonas (kraštas) atkasamas. Gruntas aplink žiedą ir jo apačią apipjaunamas peiliu. Žiedą iškėlus, išsikišęs gruntas nupjaunamas viršutinėje ir apatinėje žiedo plokštumose peiliu, kartu nuvalomi žiedo šonai. Jeigu kai kurios grunto dalelės išluptos, tai šios ildubos užpildomos gruntu lengvai prispaudžiant. Galiausiai žiedas su gruntu yra pasveriamas elektroninėmis svarstyklėmis ir skaičiuojamas grunto tankis pagal žemiau pateiktą formulę:

(3)

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{V};$$

čia:

ρ - grunto tankis;

m_1 - grunto su žiedu masė, g ;

m_2 - žiedo masė, g ;

V - žiedo vidinis tūris, cm^3 .

Nustačius grunto drėgnį ir jo tūrį galima apskaičiuoti to grunto poringumo koeficientą e . Poringumo koeficientas parodo grunto porų tūrį kietųjų dalelių tūrio atžvilgiu ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{\rho_s(1 + 0,01W) - \rho}{\rho};$$

čia:

e – poringumo koeficientas;

ρ - grunto tankis;

ρ_s – kietųjų dalelių tankis;

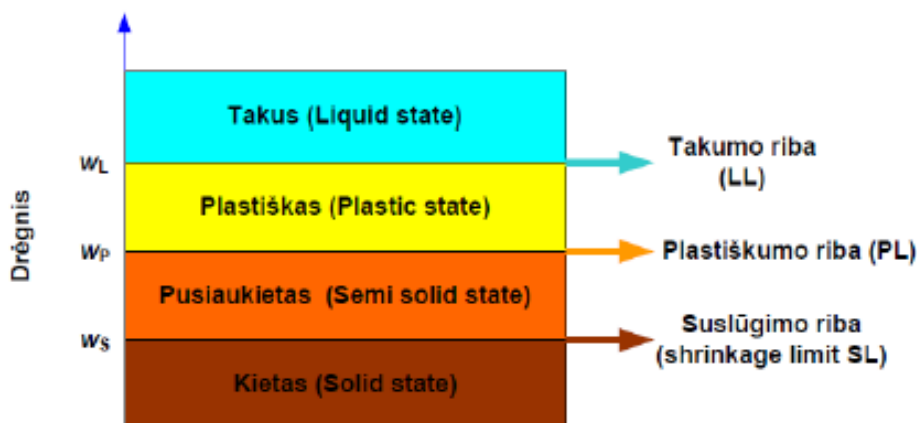
W - grunto drėgnis.

2.1.4. Atterbergo ribų nustatymas

Kintant grunto drėgniui kinta to grunto konsistencija, t.y. kinta grunto savybės. Nors ir drėgnis sąlygoja grunto konsistencija, tačiau nėra tas rodiklis, kuris apibūdina grunto konsistenciją. Esant tam pačiam drėgniui skirtingos mineralinės sudėties ar skirtingos struktūros – gruntai nebūna tos pačios konsistencijos. Taigi, jam nustatyti švedų mokslininkas A. Atterbergas įvedė tris ribas, kurios apibūdina grunto konsistenciją. Todėl šios ribos dar vadinamos Atterbergo ribomis ir yra:

- *Suslūgimo riba*. Suslūgimo riba – tai grunto drėgnumo riba, kai drėgniui mažėjant, nemažėja grunto tūris. Tačiau praktiškai šis rodiklis nėra naudojamas, kadangi šią ribą gana sunku nustatyti, tai pat grunto konsistenciją galima nustatyti kitų dviejų Atterbergo ribų pagalba.
- *Plastiškumo riba*. Tai toks rodiklis, kai esant atitinkam vandens kiekiui, gruntas pereina iš kietos būklės į plastišką arba atvirkščiai.
- *Takumo riba*. Drėgnio riba, kuriam padidėjus gruntas pereina iš plastiškosios būklės į taktą ir atvirkščiai.

Šio grunto konsistenciją apibūdinančios ribos vaizdžiau pateiktos 10 paveiksle.



10 pav. Grunto būseną pagal Atterbergo ribas [69]

Molinio grunto takumo ir plastiškumo drėgniai nustatomi laboratoriniais metodais pagal LST 1360.4:1995 standartą.

Plastiškumo drėgnio nustatymas.

Molio plastiškumo drėgnis nustatomas pagal tokią tyrimų metodiką:

1. Paruošiama grunto pasta, t.y. įdėtas gruntas į dubenėlį sutrinamas su grūstuvėliu bei sudrėkinamas vandeniu. Gruntas dubenėlyje minkomas kol pasidaro tiršta grunto pasta. Dubenėlis su pasta įdedamas į eksikatorių su vandeniu ir laikomas jame ne mažiau nei 2 valandas, kad susidarytų vienodo drėgnio masė.

2. Paimamas nedidelis grunto pastos gabalėlis, padedamas ant plastmasinės lentelės ir delnu kočiojamas kol susidaro apie 3 mm skersmens ir ne ilgesnis nei delno pločio volelis. Jeigu volelis netrūkinėja atskirus gabalėlius, jis perminkomas ir vėl kočiojamas. Procesas kartojamas tol, kol apie 3 mm. skersmens volelis pradės trūkinėti visame ilgyje, t.y. jame atsiras skersiniai plyšiai. Tai rodo, kad grunto drėgnis lygus jo plastiškumo drėgniui. Tinkamai iškočioto volelio vaizdas iliustruojamas 11 paveiksle.

3. Volelio gabalėliai sudedami į metalinį indelį, kuris yra iš anksto pasveriamas, ir uždengiami dangteliu. Tada pagal 2.1.2. skyrelio metodiką nustatomas grunto drėgnis. Su kiekvienu grunto pavyzdžiu atliekami ne mažiau kaip du bandymai, kurių rezultatų skirtumas turi būti ne didesnis nei 2 %.



11 pav. Plastiškumo drėgnio grunto volelis

Takumo drėgnio nustatymas.

Molio takumo drėgnis laboratorinėmis sąlygomis nustatomas specialiu prietaisu, pavaizduotu 12 paveiksle.



12 pav. Takumo drėgnio nustatymo prietaisas

Takumo ribai nustatyti paruošiama molinio grunto pasta, kaip jau buvo aprašyta plastiškumo drėgnio nustatymo bandymo metodikoje. Grunto pasta sutalpinama į indelį ir jį pripildžius, indelis padaužomas į tamprų paviršių, kad iš pastos masės pasišalintų oras. Grunto pastos paviršius sulyginamas su indelio viršutiniais kraštais ir indelis su pasta pastatomas ant stovelio. Balansuojantis kūgio smaigalys, patepamas plonu vazelino sluoksniu, šis kūgis uždedamas ant grunto pastos paviršiaus ir jam leidžiama jam laisvai savo svoriu smigti į grunto pastą. Jeigu kūgis per 5 sekundes įsminga į molio pastą lygiai 10 mm (iki atžymos ant kūgio), skaitoma, kad grunto drėgnis atitinka takumo drėgnį. Jeigu kūgis įsminga mažiau nei 10 mm, grunto pastą reikia išimti ir įpilti truputį vandens ir vėl atlikti prieš tai aprašytą procesą. Jei balansuojantis kūgis įsminga daugiau nei 10 mm, išėmus pastą iš indelio ir perdėjus į dubenėlį ji maišoma, garinamas vanduo laboratorijos aplinkoje, tada vėl kartojamas takumo ribos nustatymo metodas, kol bus pasiektas takumo drėgnis. Pasiekus molio takumo drėgnį, pasta išimama iš indelio ir pagal 2.1.2. poskyrio metodiką nustatomas pastos drėgnis. Šis drėgnis laikomas tiriamojo molio takumo riba.

Tada apskaičiuojami grunto konsistenciją apibūdinantys rodikliai:

(5)

$$I_p = W_L - W_p;$$

(6)

$$I_C = \frac{W_L - W}{I_p};$$

čia:

I_p – plastiškumo rodiklis;

W_L - grunto takumo riba;

W_p – grunto plastiškumo riba;

W - grunto natūralus drėgnis;

I_C -konsistencijos rodiklis.

LST EN ISO 14688-2 standarte pateikiamas dulkių ir molių klasifikavimas pagal konsistencijos rodiklį:

7 lentelė. LST EN ISO 14688-2:2007 pateikiamas dulkių ir molių klasifikavimas pagal konsistencijos rodiklį.

Dulkių ir molių konsistencija	Konsistencijos rodiklis I_c
Labai minkšta	<0,25
Minkšta	nuo 0,25 iki 0,50
Kieta	nuo 0,50 iki 0,75
Standi	nuo 0,75 iki 1,00
Labai standi	>1,00

2.1.5. Proktoro tankio nustatymas

Proktoro bandymo metu nustatomas optimalus grunto drėgnis, kuriam esant grunto kietosios dalelės daugiausiai sutankėja. Sutankinimas padidina grunto stiprumą (tamprumo modulį) ir sumažina spūdumą. Yra nustatyta, kad sutankinto grunto stiprumas padidėja 2-3 kartus [69]. Tai pat literatūroje [70] teigiama, kad optimalus tankinamų molinių gruntų drėgnis yra lygus $W_0 = W_P - (1 - 3)\%$, čia: W_P – molinio grunto plastiškumo drėgnis.

Proktoro bandymas atliekamas pagal LST 1360-2:2015 standartą. Bandymai atliekami su 7 skirtingo drėgnio molinio grunto pavyzdžiais. Pavyzdžiai formuojami iš molio miltelių (žr. 7 pav.) sumaišant juos su vandens kiekiu (atmetant vandens kiekį gautą iš aplinkos), apskaičiuotu pagal norimo gauti grunto drėgnį. Pirmas pavyzdys formuojamas apytiksliai 15 % drėgnio. Kitų pavyzdžių drėgniai didinami po 3 %. Gruntas tankinimas specialiu Proktoro prietaisu, kuris pavaizduotas 21 paveiksle.



13 pav. Proktoro tankio nustatymo prietaisas

Grunto tankinimo eiliškumas:

Prietaiso pagrindas su cilindru ir uždedamuoju žiedu pastatomas ant lygios ir tvirtos plokštumos. Šiek tiek daugiau nei trečdalis cilindro tūrio pripildoma grunto pavyzdžiu ir išlyginus paviršių grunto pavyzdys prispaudžiamas mediniu štampu. Tuomet atliekamas pirmasis

tankinimas. Grunto tankinimo procesas atliekamas, įtaiso viduje esančiu, krintančiu krūviu. Svarbu tankinimą atlikti ištisai ir vienodai smūgiuojant 3 – 4 apėjimais aplink cilindro sienutę. Tankinimo metu, specialus įtaisas laikomas vertikaloje padėtyje, iš kurios paleidžiama judanti įtaiso dalis, kuri krenta nevaržoma žemyn. Tankinimo režimas išlaikomas vienodas: smūgių skaičius – 25, smūgiavimo intensyvumas – kas 1,5 – 2,0 s, kritimo aukštis – 300 mm. Sutankinus pirmąjį grunto sluoksnį plokštelė iš cilindro ištraukiama įsukant į ją rankenėlę ir ant sutankinto paviršiaus pilamas kitas, pusė likusio nesutankinto grunto, sluoksnis. Jį išlyginus ir uždėjus plokštelę kartojamas tankinimo procesas. Viso grunto pavyzdžio tankinimas turi būti atliekamas per 3 kartus. Atlikus visą grunto tankinimo procesą nuimamas žiedas ir gruntas sulyginamas su cilindro viršumi, jeigu sutankintas gruntas yra žemiau cilindro viršaus, išmatuojamas grunto tūris cilindre. Sutankintas gruntas su cilindru pasveriamas ir atliekamas grunto drėgnio nustatymas pagal 2.1.2. skyrelyje aprašytą metodiką. Bandymas kartojamas su visais suformuoto drėgnumo molio pavyzdžiais.

Optimalus grunto drėgnis nustatomas Proktoro kreivės pagalba, kurios horizontalioje ašyje atidėtos grunto drėgnio reikšmės, o vertikaloje – sauso grunto tankio reikšmės, šios reikšmės apskaičiuojamos pagal formulę:

(7)

$$\rho_s = \frac{m_s}{V} = \frac{\rho}{1 + W};$$

čia:

ρ_s - sauso grunto tankis;

m_s - sauso pavyzdžio masė, g;

V - grunto pavyzdžio tūris cilindre, cm^3 .

2.1.6. Tankio nustatymas spūdumo prietaisu

Šio tyrimo tikslas nustatyti reikalingą apkrovą, kuriai esant gaunamas grunto kietųjų dalių tankis artima arba didesnis negu gautas tankio Proktoro bandymo metu. Šis bandymas atliekamas norit gauti didelį skaičių pavyzdžių panašaus tankio, kadangi kitomis priemonėmis tai atlikti būtų gana sudėtinga.

Bandymo atlimo eiga:

1. Paruoštas optimalaus drėgnumo molis, nustatytas pagal 2.1.5. skyrelio metodiką, molis, beriamas į žinomos formos cilindrinis žiedus, kurių matmenys ir masė žinomi iš anksto. Molis beriamas trimis sluoksniais, kiekvienas sluoksnis po įbėrimo patankinamas mediniu štapeliu (žr. 14 pav.).



14 pav. Patankintas molis cilindrinuose žieduose

2. Pavyzdžiai pasveriami kartu su žiedu 0,01g tikslumo svarstyklėmis.

3. Toliau pavyzdžiai surenkami į suspaudimo prietaisui pritaikytas talpyklas, grunto viršuje ir apačioje uždedamas filtracinis popierius, taip pat šio specialios talpyklos įdedamos į polietileninius maišelius, kad molis kuo mažiau drėgmės prarastų dėl aplinkos poveikio. Galiausiai šios specialios talpyklos sudedamos į spūdumo aparatą (žr. 15 pav.).

4. Užfiksuojamos pradinės indikatorių reikšmės, kurio tikslumas 0,01 mm.

5. Kiekvienas pavyzdys apkrovas skirtinga ašine jėga ir ši apkrova palaikoma nemažiau negu 24h.

6. Prieš nukraunant apkrovas užfiksuojamos galutinės indikatorių reikšmės.



15 pav. Pavyzdžiai spūdumo aparate

2.1.7. Kirpimo bandymai

Vienas iš pagrindinių rodiklių, kurie apibūdina grunto stiprumą, yra grunto kerpamasis stipris. Grunto kerpamasis stipris išreiškiamas pagal Moro ir Kulono teoriją išreiškiamas dviem

parametrais: vidiniu trinties kampu φ ir sankiba c . Ribinis grunto kerpamasis stipris išreiškiamas Kulono dėsnio, kuris pateiktas formulės išraiška:

(8)

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi;$$

čia:

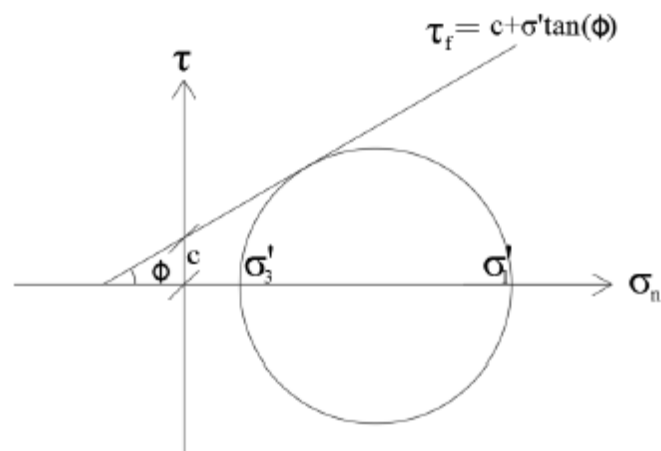
τ_f - tangentiniai įtempimai irimo plokštumoje;

σ - normaliniai įtempimai irimo plokštumoje;

c - sankiba;

φ - vidinės trinties kampas.

Lygtis rodo, kad kai dešinėje lygybės pusėje esančių verčių sumą viršija šlyties įtempis, gruntas suyra. Lygtis tai pat gali būti grafiškai išreikšta Moro apskritimo pagalba (žr. 16 pav.) Moro apskritimas kerta horizontalią ašį dvejose vietose. Dešinės pusės sankirta, žymima simboliu σ_1 ir vadinama pirmaisiais svarbiausias normalinis įtempis, o kairėje pusėje sankirta σ_3 vadinama trečiausias svarbiausias normalinis įtempis. Kuo didesnis skirtumas gaunamas tarp vertikalių ir horizontalių įtempių, tuo apskritimas didesnis. Tiesė τ_f yra apskritimo liestinė ir kartu irimo plokštuma, kurios pagalba nustatomi grunto parametrai [71].



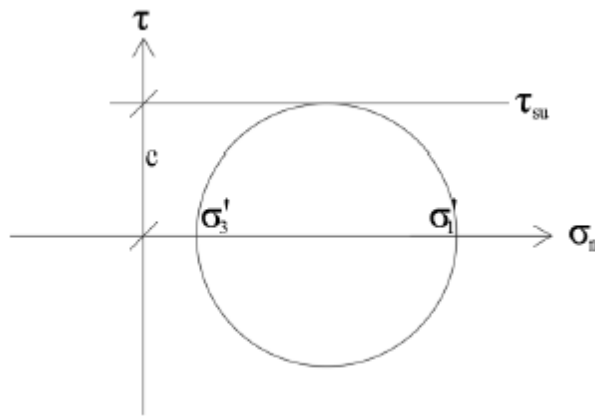
16 pav. Grunto kerpamojo stiprio grafikas pagal Moro – Kulono teoriją

Kai gruntas prisotinamas vandeniu jo vidinės trinties kampas yra lygus nuliui, kadangi porų užpildymas vandeniu eliminuoja trintį tarp grunto dalelių. Tuomet grunto kerpamasis stipris nepriklauso nuo jį veikiančių normalinių įtempių ir išreiškiamas sekančia lygybe:

(9)

$$\tau_u = c;$$

Grunto stiprumo gaubtinė tampa 27 paveiksle pavaizduotos formos.



17 pav. Vandenių prisotinto grunto kerpamojo stiprio grafikas

Kerpamasis bandymas atliekamas tiesioginio kirpimo aparatu, kuris pateiktas 18 paveiksle. Bandymas atliekamas nekonsoliduojant molį.



18 pav. Kirpimo aparatas

Pavyzdžių formavimo eiga.

1. Molio milteliai sumaišomi su optimaliu vandens kiekiu, kuris buvo nustatytas Proktoro tankio nustatymo metu. Ši gauta masė sudedama į polietileninį maišelį, užrišama ir paliekama stovėti nemažiau 12h, kad tolygiai drėgmė pasiskirstytų molyje.

2. Pavyzdžiai sutankinami su spūdumo nustatymo prietaisu. Tankinimo apkrovos dydis nustatomas „tankio nustatymo spūdumo prietaiso“ bandymo metu, taip visi kerpami pavyzdžiai suformuojami su nustatyta apkrova.

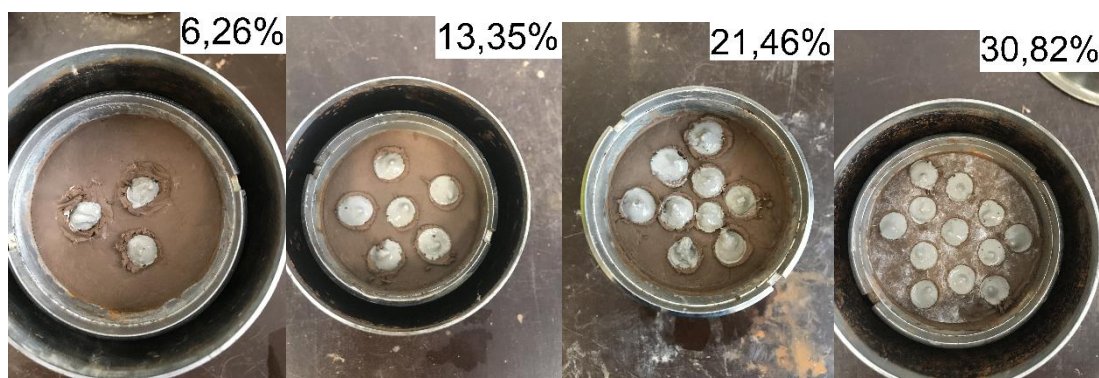
3. Molio pavyzdžiuose suformuojamos skylės, kurių skersmuo 1 cm. Skylių skaičius molio bandiniuose: 3; 6; 9 ir 12; pateikta 19 paveiksle.



19 pav. Molio bandinių tipai

4. Į molio bandinius su skylėmis injektuojami skysti šlakiniai geopolimerai, kurių sudėtis buvo nurodyta 2.1.1.2. skyrelyje. Geopolimerai injektuojami 50 ml švirkštu. Geopolimerai įterpiami skylėse: švirkštą lėtai keliant iš skylės apačios į viršų, kartu švelniai spaudžiant švirkšto cilindro viršų.

5. Moliniai bandiniai su įterptais geopolimerais įdedami į polietileningus maišelius, užrišami ir paliekami kietėti 7 paras.



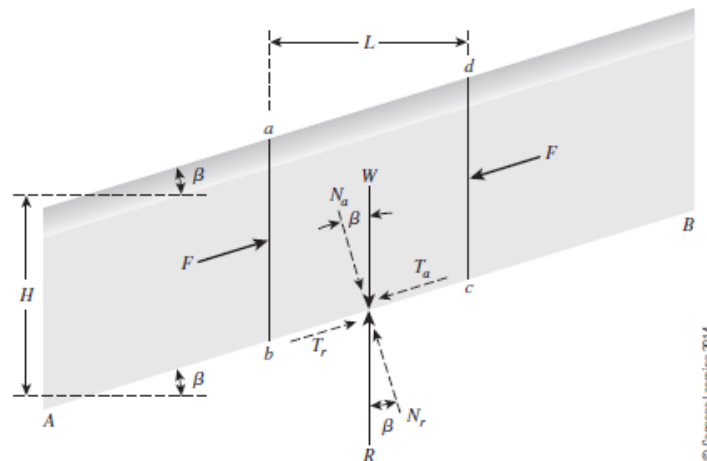
20 pav. Molio bandinių tipai su įterptais šlakiniais geopolimerais

2.1.8. Šlaitų stabilumo analizė kompiuterine programa

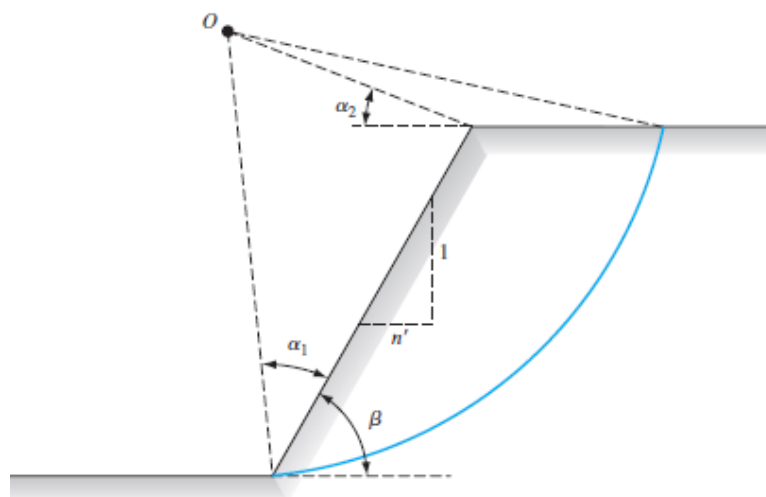
Šlaitų stabilumo analizės skaičiavimai atliekami „Fides DV-Partner“ programos paprogramiu „Fides SlipCircle“. Skaičiavimuose dalinių koeficientų reikšmės priimamos lygios vienetui.

Šlaito stabilumo skaičiavimus galima atlikti dviem slydimo variantams [72]: kai slenka grunto sluoksnis (linijinis judėjimas, 21 pav.), arba kai gruntas slenka cilindriškai (sukamasis judėjimas, 22 pav.). Tačiau šiame darbe nagrinėjamas, tik antrasis šlaito judėjimo variantas, kadangi pirmajame variante grunto viršutinis sluoksnis juda kito sluoksnio atžvilgiu, tokiam judėjimui apriboti užteka žinoti slinkimą stabdančios medžiagos kerpamąją stiprį. O antrame

variante grunto masyvas slenka cilindriškai, tokiu atveju ypač svarbus bendras grunto ir slenkantį judėjimą stabdančios medžiagos darbas, dėl šios priežasties, ir nagrinėjamas antrasis variantas.



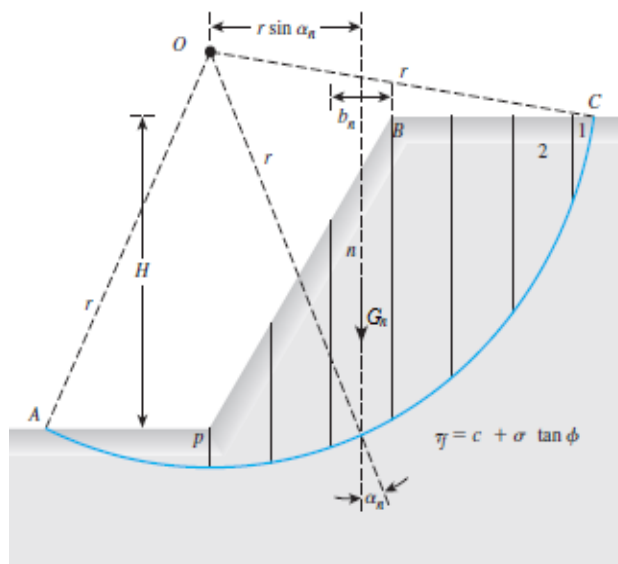
21 pav. Šlaido sluoksnio slinkimas



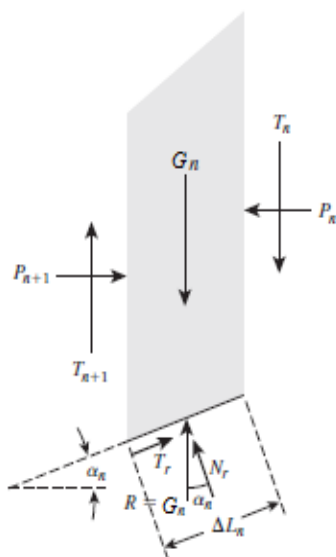
22 pav. Apskritiminis šlaido slinkimas

2.1.9. Šlaido stabilumo analizė – padalinimo metodu

Šlaido stabilumo analizė, naudojant padalinimo metodą, paaiškinama pagal 23 a paveikslą. Grunto šlaido slinkimo paviršius AC yra apskritiminės formos. Grunto masyvas virš slinkimo paviršiaus sudalinamas į vienodus b_n vertikalius segmentus. Jėgos, kurios veikia segmente n , parodytos 23 b paveiksle: G_n yra aktyvioji segmento svorio jėga. Jėgos N_r ir T_r grunto reakcijos R normalinės ir tangentinės komponentės. P_n ir P_{n+1} yra normalinės vidinės jėgos, veikiančios abejose segmento pusėse, tačiau jos yra apytikriai lygos, bet priešingų jėgų, todėl jos formulėse nėra vertinamos. Taip pat, T_n ir T_{n+1} vidinės skersinės jėgos, kurios veikia segmento abejose sienutėse, jos skaičiavimuose nėra vertinamos. Supaprastinti porinis vandens slėgis priimamas, kad yra lygus nuliui.



(a)



(b)

23 pav. Stabilumo analizė padalinimo metodu: a) bandomasis irimo paviršius; b) veikiančios jėgos n-ajame segmente

Grunto reakcijos normalinė komponentė n -jame segmente išreiškiama:

$$N_r = G_n \cos \alpha_n ;$$

(10)

Grunto reakcijos tangentinė komponentė n -jame segmente išreiškiama:

$$T_r = \tau_d(\Delta L_n) = \frac{\tau_f(\Delta L_n)}{F_s} = \frac{1}{F_s} [c + \sigma \cdot \tan \phi] \Delta L_n ;$$

(11)

Formulėse normalinis įtempis σ lygus:

(12)

$$\sigma = \frac{N_r}{\Delta L_n} = \frac{G_n \cos \alpha_n}{\Delta L_n};$$

Sudaroma pusiausvyros lygtis, slystančio grunto masyvo ABC : poveikio (grunto masyvo savojo svorio) momentas apie tašką O , kuris lygus grunto reakcijos momentui apie tašką O :

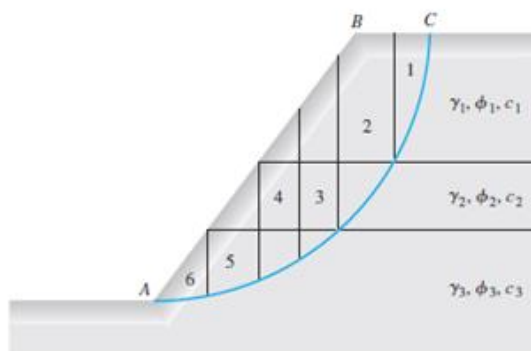
(13)

$$\sum_{n=1}^{n=p} G_n \sin \alpha_n = \sum_{n=1}^{n=p} \frac{1}{F_s} \left(c + \frac{G_n \cos \alpha_n}{\Delta L_n} \tan \varphi \right) (\Delta L_n)(r);$$

(14)

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c \Delta L_n + G_n \cos \alpha_n \tan \varphi)}{\sum_{n=1}^{n=p} G_n \sin \alpha_n};$$

23 paveiksle šlaitas pateiktas homogeninio grunto, tačiau padalinimo metodas gali būti panaudotas ir šlaitams su skirtingais grunto sluoksniais (24 pav.). Bendrai skaičiavimo eiga išlieka ta pati. Tačiau, būtina įsidėmėti, kad skaičiuojant saugos koeficientą 14 formulėje reikšmės c , φ visuose ruožuose ne bus vienodos. Pavyzdžiui, ruožas nr. 3 (24 pav.), vidinis trinties kampas $\varphi = \varphi_3$ ir sankiba $c = c_3$, tai pat ir ruože nr. 2, vidinis trinties kampas $\varphi = \varphi_2$ ir sankiba $c = c_2$.

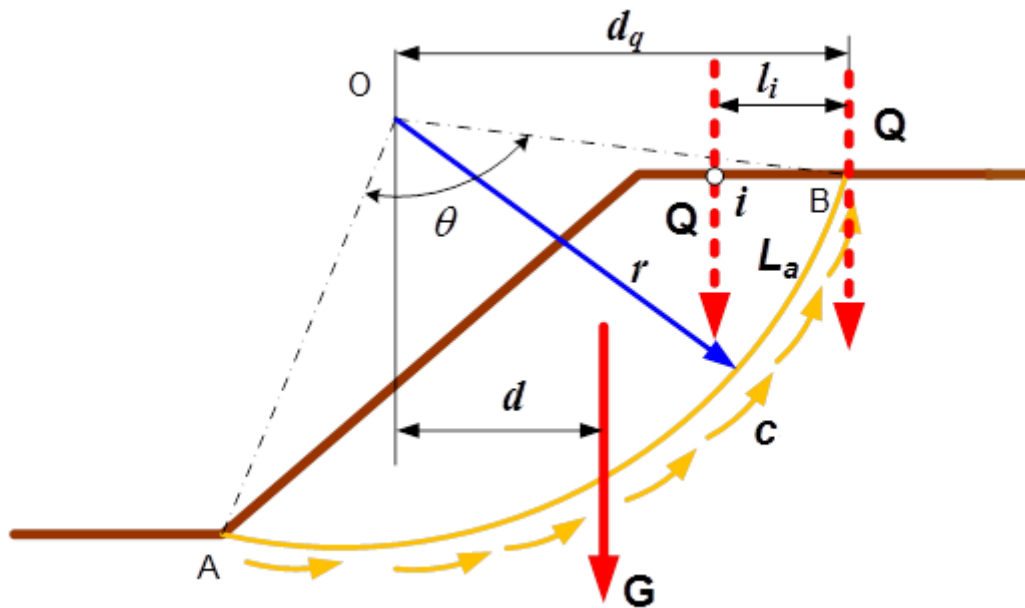


24 pav. Stabilumo analizė padalinimo metodu šlaitams, kuriuose gruntai išsidėstę sluoksniais

2.1.10. Analizės pavyzdys su išskirstytu krūviu ant šlaito

Praktikoje problema atsiranda, kai reikia įvertinti statinio šlaito stabilumui. Laikoma, kad yra žinomi molio šlaito parametrai c ir φ . Tuomet galima nubraižyti šlaito skaičiuojamąjį

modelį (žr. 25 pav.). Žinant išskirstyto krūvio ant šlaito sutelktosios jėgos didumą Q ir jos pridėties tašką (atstumą d_q), galime įvertinti momentą taške i (žiūr. 25 pav.)



25 pav. Stabilumo analizė skaičiuojamoji schema su išskirstyta apkrova

(15)

$$M_i = Qd_q \left(\frac{r}{r+l_i} \right);$$

Čia: $l_i = r - d_q$.

Taigi, kad maksimalus poveikis bus taške B, kai $d_q = r$ ir $l_i = 0$:

(16)

$$M_{\max} = Qr;$$

Apytiksliai parametras d apskaičiuojamas:

(17)

$$d = 0.45r_d;$$

Galiausiai apskaičiuojamas minimalus šlaito su papildoma apkrova saugumo veiksnys:

(18)

$$F_{s.min} = \frac{cL_a r}{Gd + M_{\max}} = \frac{cL_a r}{Gd + Qr};$$

3. TYRIMŲ REZULTATAI

3.1. Suardytos struktūros molio natūralaus drėgnio nustatymas

Atlikus molio pavyzdžių drėgnio nustatymo tyrimą pagal 2.1.2. skyrelyje aprašytą bandymo metodiką, gauti rezultatai pateikiami 8 lentelėje.

8 lentelė. Suardytos struktūros molio natūralaus drėgnio nustatymas.

Pavyzd. Nr.	Tuščio indelio masė, g	Indelio su drėgnu gruntu masė, g	Indelio su sausu gruntu masė, g	Drėgnis W, %		Matavimo paklaida, %
				Pavyzdžio	vidutinis	
1	14,99	53,14	51,83	3,55	3,53	1,13
2	13,31	46,39	45,27	3,51		

Iš šios lentelės matyti, kad pavyzdžių drėgnio skirtumas neviršija 2 %, todėl galima laidyti, kad bandymo rezultatai patikimi. Ši drėgnio reikšmės bus įvertinama, maišant kitus molio pavyzdžius.

3.2. Atterbergo ribų nustatymas

Molio plastiškumo ribos rezultatai pateikiami 9 lentelėje, o takumo ribos tyrimo rezultatai matomi 10 lentelėje.

9 lentelė. Plastiškumo ribos bandymų rezultatai.

Pavyzd. Nr.	Tuščio indelio masė, g	Indelio su drėgnu gruntu masė, g	Indelio su sausu gruntu masė, g	Plastiškumo drėgnis W_p , %		Matavimo paklaida, %
				Pavyzdžio	vidutinis	
1	14,99	33,54	29,49	27,93	27,85	0,66
2	13,31	26,71	23,80	27,76		

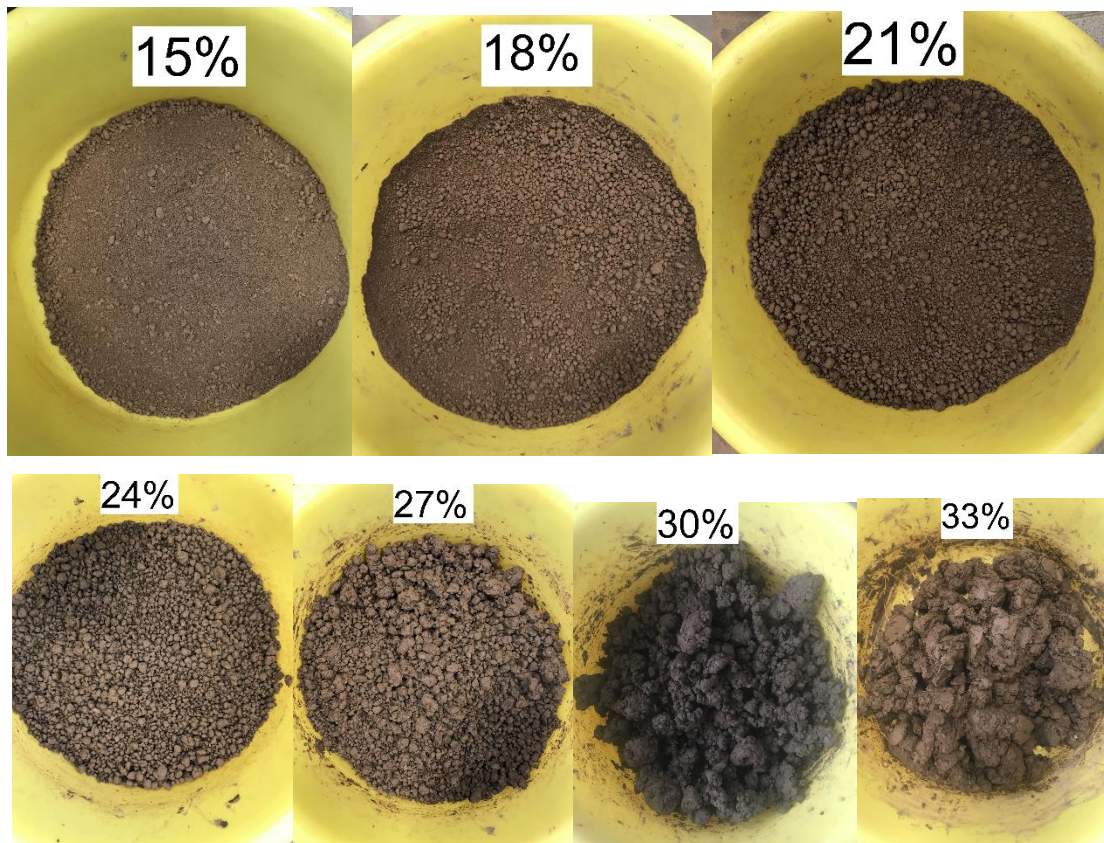
10 lentelė. Takumo ribos bandymų rezultatai.

Pavyzd. Nr.	Tuščio indelio masė, g	Indelio su drėgnu gruntu masė, g	Indelio su sausu gruntu masė, g	Takumo drėgnis W_t , %		Matavimo paklaida, %
				Pavyzdžio	vidutinis	
3	14,99	26,13	22,42	49,87	49,57	1,23
4	13,86	22,97	19,96	49,26		

Taigi, šiame bandyme nustatyta, kad tiriamojo molio plastiškumo drėgnis lygus 27,85 %, o jo takumo drėgnis yra 49,57 %. Pagal 5 formulę apskaičiuota, jog tolimesniuose tyrimuose naudojamo molio plastiškumo rodiklio reikšmė $I_p = 21,72 \%$.

3.3. Proktoro tankio nustatymas

Šiame bandyme buvo formuojami molio pavyzdžiai iš molio miltelių ir atitinkamo kiekio vandens (žr. 26 pav.). Maišymo metu pastebėta, kad didėjant vandens kiekiui molyje: molis tamsėjo, atsirasdavo vis didesni sulipusio molio gumulėliai.



26 pav. Sumaišyti skirtingo drėgnio molio milteliai

Atlikus Proktoro bandymą pagal 2.1.5. skyrelyje aprašytą tyrimo metodiką, gauti duomenys surašyti 11 lentelėje. Iš šių duomenų sudaroma molio Proktoro kreivė (žr. 27 pav.). Iš kreivėje gautos funkcijos apskaičiuojama optimalaus drėgnio reikšmė:

(19)

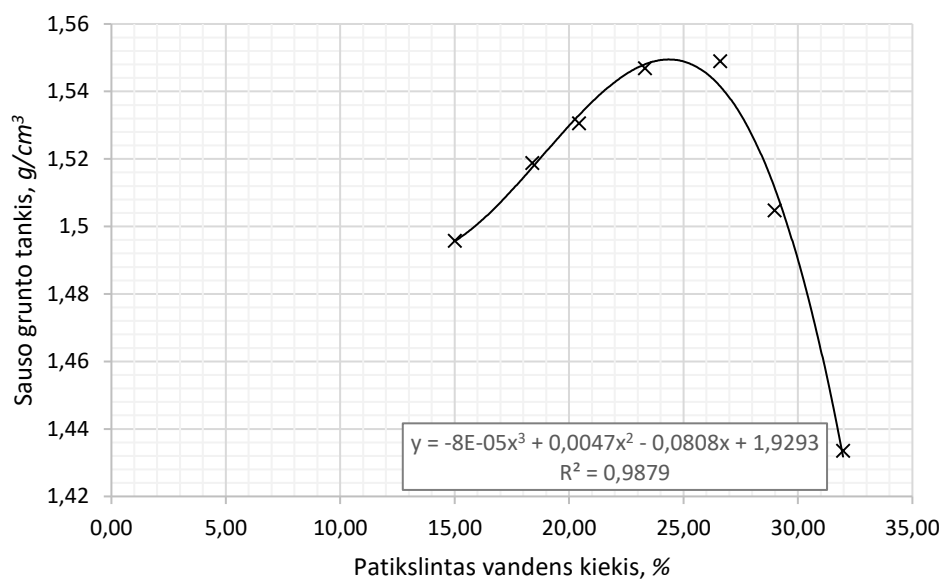
$$\frac{dy}{dx} = -\frac{4040 + x \cdot (-235 + 4 \cdot x - 235 + 8 \cdot x)}{50000} = 0;$$

Iš šios lygties apskaičiuojamas $x = 26,4 \%$, kuris ir rodo optimalaus drėgnio reikšmę. Įstačius šią drėgnio reikšmę į kreivės funkciją gaunamas molio dalelių optimalus Proktoro tankis $\rho_s =$

1,6 g/cm³. Galima teigti, kad optimalus molio drėgnis nustatytas teisingai, kadangi literatūroje, kad jis turi būti 1 - 3 % mažesnis už jo plastiškumo drėgnį.

11 lentelė. Proktoro bandymo rezultatai.

Parametrai	Simbolinė išraiška	Bandymo Nr.						
		1	2	3	4	5	6	7
Sauso pavyzdžio masė	m_d, g	1367	1343	1338	1301	1321	1329	1313
Supilta vandens masė pavyzdyje	m_w, g	223	260	284	315	359	400	435
Grunto drėgnis	$W=m_w/m_d$	0,163	0,194	0,212	0,242	0,272	0,301	0,331
Vandens kiekis procentais	$W \cdot 100\%$	16,3	19,4	21,2	24,2	27,2	30,1	33,1
Sutankinto pavyzdžio masė su cilindro mase	$m+m_c, g$	5180	5204	5228	5218	5280	5330	5336
Cilindro masė	m_c, g	3616	3616	3616	3616	3616	3616	3616
Sutankinto drėgno pavyzdžio masė	m, g	1564	1588	1612	1602	1664	1714	1720
Sutankinto pavyzdžio aukštis cilindre	h, cm	10,5	10,2	10,1	9,7	9,8	10,2	10,5
Sutankinto pavyzdžio tūris cilindre	V, cm^3	909,20	883,22	874,56	839,92	848,58	883,22	909,20
Drėgno grunto masė po sutankinimo su indelio mase	m_s, g	73,23	63,67	66,39	74,41	55,06	79,72	85,26
Gruntas masė po džiovinimo su indelio mase	m_s, g	65,63	55,85	57,48	63,18	46,29	65,18	67,83
Indelio masė	m_i, g	14,99	13,31	13,86	14,99	13,31	14,99	13,31
Patikslintas grunto drėgnis	$W_p=(m_s-m_i)/(m_s-m_i)$	0,1501	0,1838	0,2043	0,2330	0,2659	0,2897	0,3197
Patikslintas vandens kiekis procentais	$W_p \cdot 100\%$	15,01	18,38	20,43	23,30	26,59	28,97	31,97
Drėgno grunto tankis	$\rho = m/V, g/cm^3$	1,720	1,798	1,843	1,907	1,961	1,941	1,892
Sauso grunto tankis	$\rho_d = \rho / (1 + W_p), g/cm^3$	1,496	1,519	1,531	1,547	1,549	1,505	1,433



27 pav. Proktoro kreivė

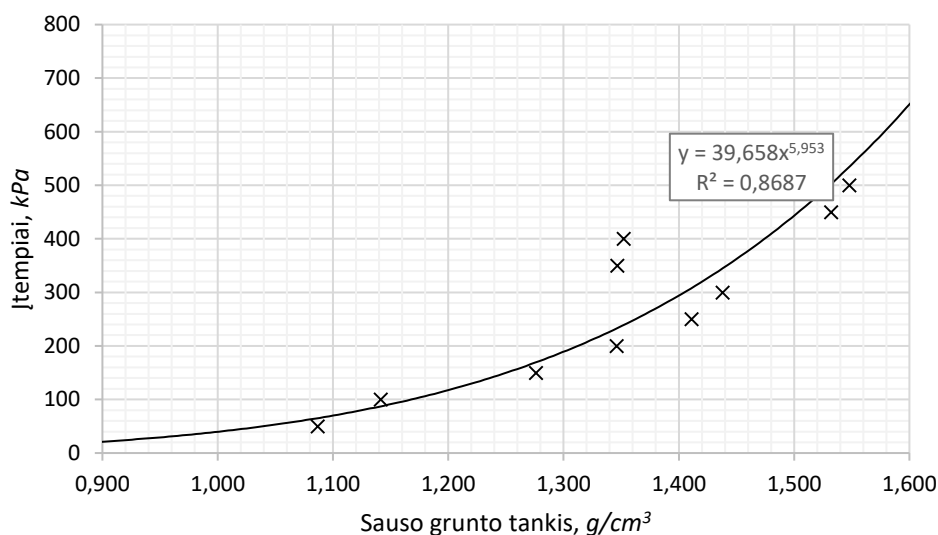
3.4. Tankio nustatymas spūdumo prietaisu

Atlikus bandymą pagal 2.1.6. skyrelio suformuotą metodiką, gauti rezultatai patalpinti 12 lentelėje.

12 lentelė. Tankinimo rezultatai spūdumo prietaisu.

Parametrai	Simbolinė išraiška	Bandymo Nr.									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cilindro masė	m_c, g	74,23	71,93	69,86	74,05	89,35	74,47	72,13	69,17	73,89	89,49
Drėgno molio masė cilindre	m_c+m, g	238,17	234,36	242,12	245,26	253,45	238,04	235,11	242,31	245,26	253,13
Drėgno molio masė	m, g	163,94	162,43	172,26	171,21	164,1	163,57	162,98	173,14	171,37	163,64
Molio aukštis cilindre	h_0, cm	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Įtempiai	σ, kPa	50,00	100,00	150,00	200,00	250,00	300,00	350,00	400,00	450,00	500,00
Aukščio pokytis gautas iš indikatoriaus rodmenų	$\Delta h, mm$	4,83	6,4	7,99	9,55	11,79	12,2	10,76	9,51	12,64	13,84
Molio aukštis cilindre po apkrovimo	$h=h_0-\Delta h, cm$	3,017	2,86	2,701	2,545	2,321	2,28	2,424	2,549	2,236	2,116
Molio skerspjūvio plotas cilindre	A, cm^2	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Molio užimamas tūris cilindre	V, cm^3	120,68	114,40	108,04	101,80	92,84	91,20	96,96	101,96	89,44	84,64
Grunto drėgnis procentais	$W, \%$	24,80	24,80	24,80	24,80	24,80	24,80	24,80	24,80	24,80	24,80
Drėgno molio tankis	$\rho = m/V, g/cm^3$	1,358	1,420	1,594	1,682	1,768	1,794	1,681	1,698	1,916	1,933
Sauso molio tankis	$\rho_s = \rho / (1 + W/100), g/cm^3$	1,089	1,138	1,278	1,348	1,416	1,437	1,347	1,361	1,535	1,549

Iš šios lentelės duomenų suformuojama molio dalelių tankio priklausomybės nuo įtempių kreivė (žr. 28 pav.).



28 pav. Molio dalelių tankio priklausomybės nuo įtempių

Taigi, iš 28 paveikslo kreivės funkcijos nustatoma apkrova reikalinga gauti Proktoro tankį. Nustatyta, kad apytikriai reikalinga 650 kPa apkrova.

Atlikus pakartotinį bandymą su 650 kPa apkrova, bandymo rezultatai pateikti 13 lentelėje, nustatyta, kad esant tokiai apkrovai molio dalelių tankis kinta nuo 1,630 iki 1,720 g/cm³. Vadinasi, visi pavyzdžiai, kurie bus naudojami kirpimo bandymams turės tokį tankį.

13 lentelė. Pakartotiniai tankinimo rezultatai spūdumo prietaisu su 650 kPa apkrova.

Parametrai	Simbolinė išraiška	Bandymo Nr.			
		1	2	3	4
Cilindro masė	m_c, g	74,27	72,04	69,85	74,00
Drėgno molio masė cilindre	m_c+m, g	267,92	260,34	252,55	264,14
Drėgno molio masė	m, g	193,65	188,3	182,7	190,14
Molio aukštis cilindre	h_0, cm	3,5	3,5	3,5	3,5
Įtempiai	σ, kPa	650,00	650,00	650,00	650,00
Aukščio pokytis gautas iš indikatoriaus rodmenų	$\Delta h, mm$	11,97	11,90	13,39	12,71
Molio aukštis cilindre po apkrovimo	$h=h_0-\Delta h, cm$	2,303	2,31	2,161	2,229
Molio skerspjūvio plotas cilindre	A, cm^2	40	40	40	40
Molio užimamas tūris cilindre	V, cm^3	92,12	92,40	86,44	89,16
Grunto drėgnis procentais	$W, \%$	24,10	24,40	24,30	24,10
Drėgno molio tankis	$\rho = m/V, g/cm^3$	2,102	2,038	2,114	2,133
Sauso molio tankis	$\rho_s = \rho / (1+W/100), g/cm^3$	1,694	1,638	1,700	1,718

4. GAUTŲ REZULTATŲ ANALIZĖ

4.1. Kirpimo bandymas

Bandinio tipo sudėtis ir žymėjimas pateiktas 14 lentelėje. Bandinių tipai suskirstyti pagal juose įterptų šlakinių geopolimerų cilindrinų polių skaičių, cilindrinų polių skersmuo yra 1 cm. Pagal užimamą geopolimerų ir molio plotą, buvo nustatyta santykinė geopolimerų dalis molyje. Geopolimerai molyje kietėjo 7 paras.

14 lentelė. Kerpamųjų bandinių sudėtis.

Bandinio tipas	Cilindro plotas, cm^2	Geopolimero cilindrų skaičius, <i>vnt.</i>	Geopolimero bendras plotas, cm^2	Molio plotas, cm^2	Geopolimero kiekis molyje, %
Molis	40	0	0	40,00	0
Molis+3C	40	3	2,36	37,64	6,26
Molis+6C	40	6	4,71	35,29	13,35
Molis+9C	40	9	7,07	32,93	21,46
Molis+12C	40	12	9,42	30,58	30,82

Atlikus bandymą pagal 2.1.7. skyrelio suformuotą metodiką, gauti rezultatai patalpinti 15 lentelėje. Pagal lentelėje suformuotus duomenis galima pastebėti, kad bandinių kerpamasis stipris didėjo, didėjant cilindriškai įterptų geopolimerinių polių skaičiui.

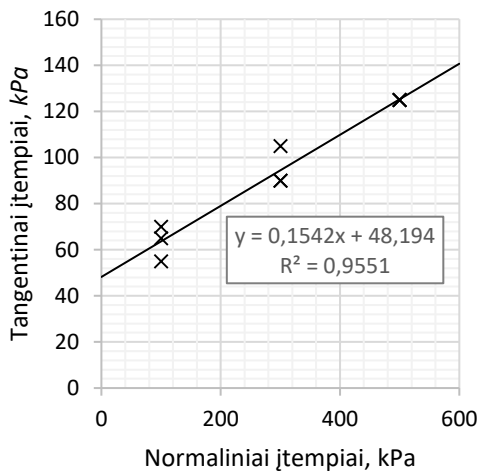
15 lentelė. Molio kirpimo bandymo rezultatai.

Bandinys	Pavyzdžio Nr.	Normaliniai įtempiai, <i>kPa</i>	Tangentiniai įtempiai, <i>kPa</i>	Drėgnis, %	Konsistencijos rodiklis I_c	Konsistencija
Molis	1	100	70	26,4	1,07	L. standi
	2	100	65	27,6	1,01	L. standi
	3	100	55	27,7	1,01	L. standi
	4	300	105	26,3	1,07	L. standi
	5	300	90	27,1	1,03	L. standi
	6	300	90	26,9	1,04	L. standi
	7	500	125	26,3	1,07	L. standi
	8	500	125	26,1	1,08	L. standi
	9	500	125	26,2	1,08	L. standi
Molis+3C	1	100	75	27,7	1,01	L. standi
	2	100	80	26,6	1,06	L. standi
	3	100	85	26,8	1,05	L. standi
	4	300	135	27,1	1,03	L. standi
	5	300	120	26,5	1,06	L. standi
	6	300	120	27,1	1,03	L. standi
	7	500	150	26,2	1,08	L. standi
	8	500	175	26,5	1,06	L. standi
	9	500	150	26,1	1,08	L. standi

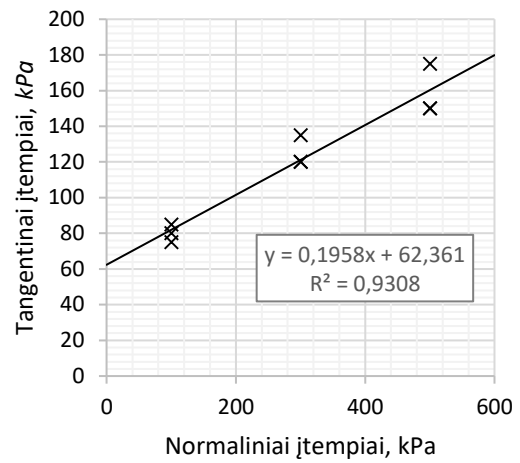
Bandinys	Pavyzdžio Nr.	Normaliniai įtempiai, <i>kPa</i>	Tangentiniai įtempiai, <i>kPa</i>	Drėgnis, %	Konsistencijos rodiklis I_c	Konsistencija
Molis+6C	1	100	115	26,6	1,06	L. standi
	2	100	95	26,5	1,06	L. standi
	3	100	100	27,0	1,04	L. standi
	4	300	165	26,7	1,05	L. standi
	5	300	135	26,0	1,09	L. standi
	6	300	165	26,5	1,06	L. standi
	7	500	200	26,7	1,05	L. standi
	8	500	225	24,5	1,15	L. standi
	9	500	175	25,3	1,12	L. standi
Molis+9C	1	100	120	26,0	1,09	L. standi
	2	100	115	26,0	1,09	L. standi
	3	100	115	26,2	1,08	L. standi
	4	300	180	26,5	1,06	L. standi
	5	300	180	26,4	1,07	L. standi
	6	300	150	26,3	1,07	L. standi
	7	500	225	26,1	1,08	L. standi
	8	500	225	25,2	1,12	L. standi
	9	500	200	25,8	1,09	L. standi
Molis+12C	1	100	135	26,5	1,06	L. standi
	2	100	160	26,6	1,06	L. standi
	3	100	125	26,7	1,05	L. standi
	4	300	165	26,2	1,08	L. standi
	5	300	210	26,3	1,07	L. standi
	6	300	195	25,8	1,09	L. standi
	7	500	275	25,8	1,09	L. standi
	8	500	250	26,7	1,05	L. standi
	9	500	250	26,8	1,05	L. standi

Iš šios lentelės duomenų sudaromos sutankinto molio ir kitų mišinių stiprumo kreivė (žr. 29 pav.). Iš šių kreivių gaunamos funkcijos, kurios parodo pagrindines charakteristikas: sankibą c ir vidinės trinties kampo tangentą $\tan \varphi$. Gautos sankibos ir vidinės trinties kampo reikšmės susistemintai patalpintos 16 lentelėje.

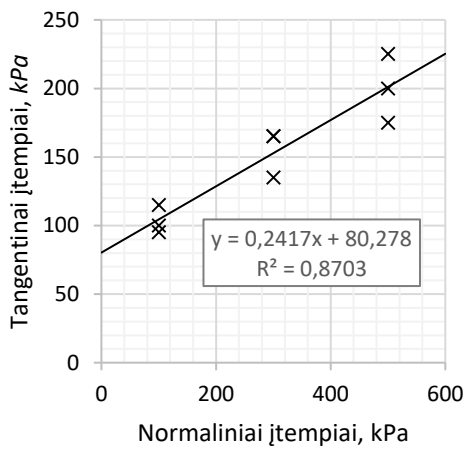
Molio kerpamojo stiprio grafikas



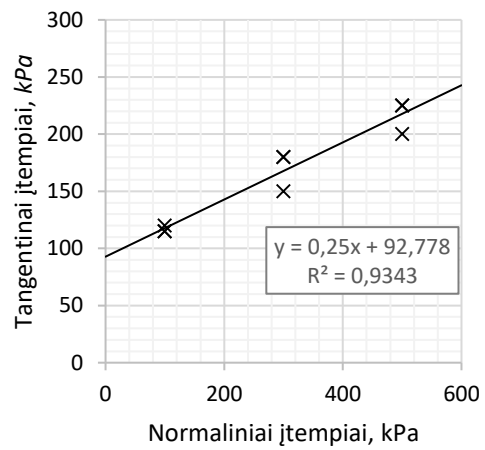
Molio+3C kerpamojo stiprio grafikas



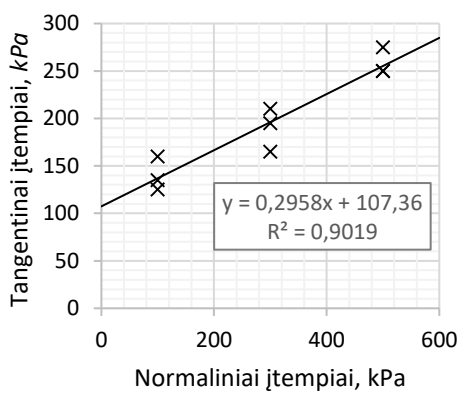
Molio+6C kerpamojo stiprio grafikas



Molio+9C kerpamojo stiprio grafikas



Molio+12C kerpamojo stiprio grafikas



29 pav. Kerpamojo stiprio kreivė

Iš tyrimo duomenų regresinės analizės, kuri pateikta 16 lentelėje, matyti, kad grunto stiprumo koreliacija labai stipri (R^2 tarp 0,87 ir 0,95) ir gali būti išreiškiama tiesine priklausomybe, kuri tapati Kulono formulei:

(20)

$$\tau = a_i + b_i \sigma ;$$

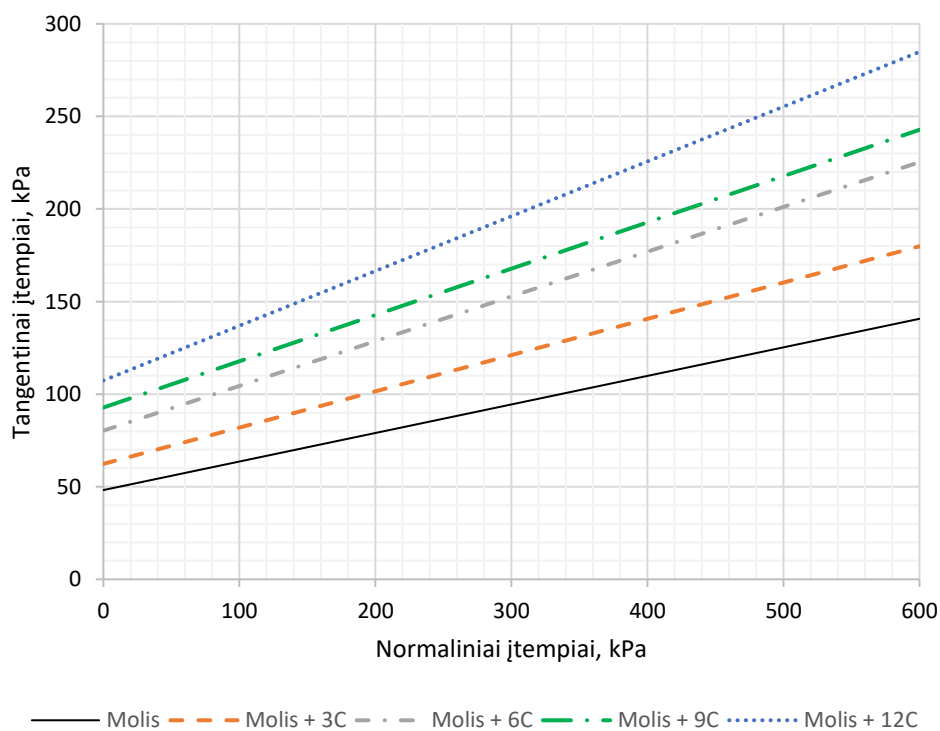
τ – tangentiniai grunto irimo įtempiai kPa ;

a_i – atitinkamas koeficientas iš 29 paveikslo, atitinkantis sankibumą, kPa ;

b_i – bematis koeficientas, atitinkantis $\tan\phi$.

16 lentelė. Susisteminti sankibos ir vidinės trinties kampo rezultatai.

Bandinio tipas	a_i, kPa	b_i	R^2
Molis	48,2	0,15	0,95
Molis+3C	62,4	0,20	0,93
Molis+6C	80,3	0,24	0,87
Molis+9C	92,8	0,25	0,93
Molis+12C	107,4	0,30	0,90



30 pav. Bendra bandinių kerpamojo stiprio diagrama

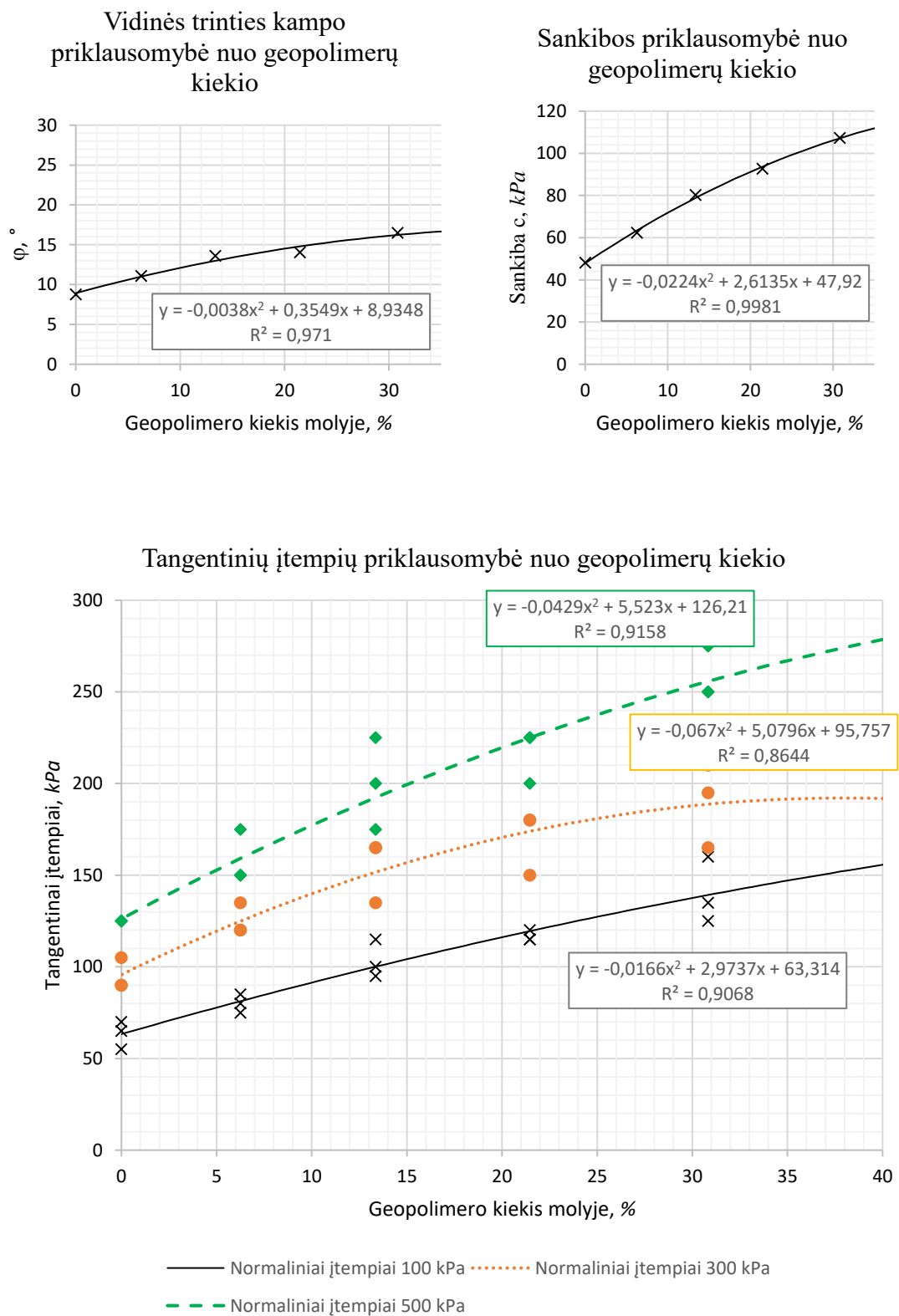
16 lentelės, tiek ir 30 paveikslu duomenys rodo, kad didėjant geopolimerų kiekiui, didėja molio bandinių tiek sankiba, tiek vidinės trinties kampas (bandinių stiprumas). Todėl galima teigti, geopolimeriniai cilindriniai poliai sustiprina molinį gruntą, nors ir molio struktūra pažeidžiama formuojant skylės, kuriose įterpiami geopolimerai. Visgi, šio lentelės detalumas nėra pakankamas ir neatskleidžia pagrindinių klausimų ar jau yra pasiektas optimalus geopolimerų kiekis molyje ir kiek geopolimerai sustiprina bandymuose naudojamą molį. Šiems klausimams atsakyti suformuojama detalesnė 17 lentelė.

Šioje lentelėje pateikiamos kiekvieno molio bandinio nustatytos tangentinių įtempių reikšmės prie skirtingų normalinių įtempių. Atskiruose stulpeliuose pateikti tangentiniai įtempiai, kurie apskaičiuoti iš tiesinių lygčių pateiktų 16 lentelėje, stiprumo padidėjimas lyginant su pradiniu molio stiprumu ir procentinis stiprumo padidėjimas, kai įterpiamas 1% geopolimerų (kietėjančių vieną savaitę). Taigi, iš lentelės duomenų galima daryti išvadą, kad nepriklausomai nuo normalinių įtempių, šlakiniai geopolimerai efektyviausi, kai jų kiekis molyje palyginti nedidelis 6-7%. Vidutiniškai kerpamasis stipris bandiniuose padidėjo 4% (pradinio molio stiprio), kai buvo pridedamas 1% geopolimerų, didėjant šlakinių geopolimerų kiekiui molyje – jų poveikis mažėjo molio bandiniuose. Didžiausias bandinių kerpamojo stiprio padidėjimas 1% geopolimerų, nustatytas ~ 5%, kai šlakinių geopolimerų kiekis buvo 6-7%.

17 lentelė. Kirpimo bandymų duomenų analizės rezultatai.

Bandinys	Geopolimero kiekis molyje, %	Tangentiniai įtempiai, kPa	Molio su geopolimerais ir molio tangentinių įtempių santykis, %	Kerpamojo stiprio padidėjimo ir geopolimerų kiekio molyje santykis	Tangentiniai įtempiai, kPa	Molio su geopolimerais ir molio tangentinių įtempių santykis, %	Kerpamojo stiprio padidėjimo ir geopolimerų kiekio molyje santykis	Tangentiniai įtempiai, kPa	Molio su geopolimerais ir molio tangentinių įtempių santykis, %	Kerpamojo stiprio padidėjimo ir geopolimerų kiekio molyje santykis
		Normaliniai įtempiai 100kPa			Normaliniai įtempiai 300kPa			Normaliniai įtempiai 500kPa		
Molis	0	63,2	0,0	-	93,2	0,0	-	123,2	0,0	-
Molis+3C	6,26	82,4	30,4	4,9	122,4	31,3	5,0	162,4	31,8	5,1
Molis+6C	13,35	104,3	65,0	4,9	152,3	63,4	4,7	200,3	62,6	4,7
Molis+9C	21,46	117,8	86,4	4,0	167,8	80,0	3,7	217,8	76,8	3,6
Molis+12C	30,82	137,4	117,4	3,8	197,4	111,8	3,6	257,4	108,9	3,5
			Vidutinis:	4,4		Vidutinis:	4,3		Vidutinis:	4,2

Toliau pateikiamos diagramos, kurios sudarytos iš 16 ir 17 lentelių. Šiose diagramose nustatomas optimalus geopolimerų kiekis pagal parametrus: vidinės trinties kampą, sankibą ir suminius tangentinis įtempius prie skirtingų normalinių įtempių.



31 pav. Geopolimerų optimalaus kiekio nustatymo diagramos

31 paveiksle pateiktų diagramų funkcijų stiprumo koreliacija labai stipri (R^2 tarp 0,86 ir 0,92), jos užrašomos pagal kvadratinę priklausomybę:

(21)

$$y = a_i \cdot x^2 + b_i \cdot x + c_i;$$

a_i, b_i, c_i – atitinkamas koeficientas iš 31 paveikslo.

Šios funkcijos diferencijuojamos ir išreiškiamos pagal tiesinę priklausomybę:

(22)

$$\frac{dy}{dx} = d_i \cdot x + e_i.$$

d_i, e_i – atitinkamas koeficientas iš 31 paveikslo.

Gautos tiesinės lygtys prilyginamos nuliui.

Pirmųjų funkcijų koeficientais, išvestinių funkcijų koeficientai ir išvestinių lygčių sprendiniai pateikiami 18 lentelėje. Pirmųjų funkcijų koeficientai surašyti 2-3 stulpeliuose, žiūrint iš kairės, išvestinių lygčių koeficientai – 4-5 stulpelyje. Gauti optimalūs procentiniai kiekiai pateikti paskutiniame 18 lentelės stulpelyje.

18 lentelė. Optimalaus kiekio nustatymo funkcijos.

Priklausomybės	funkcija y			dx/dy		dx/dy=0
	a _i	b _i	c _i	d _i	e _i	
Vidinės trinties kampo	-0,004	0,355	8,935	-0,008	0,355	46,7
Sankibos	-0,022	2,614	47,92	-0,045	2,614	58,34
Tangentinių įtempių, kai normaliniai įtempiai 100kPa	-0,017	2,974	63,31	-0,033	2,974	89,57
Tangentinių įtempių, kai normaliniai įtempiai 300kPa	-0,067	5,08	95,76	-0,134	5,08	37,91
Tangentinių įtempių, kai normaliniai įtempiai 500kPa	-0,043	5,523	126,2	-0,086	5,523	64,37

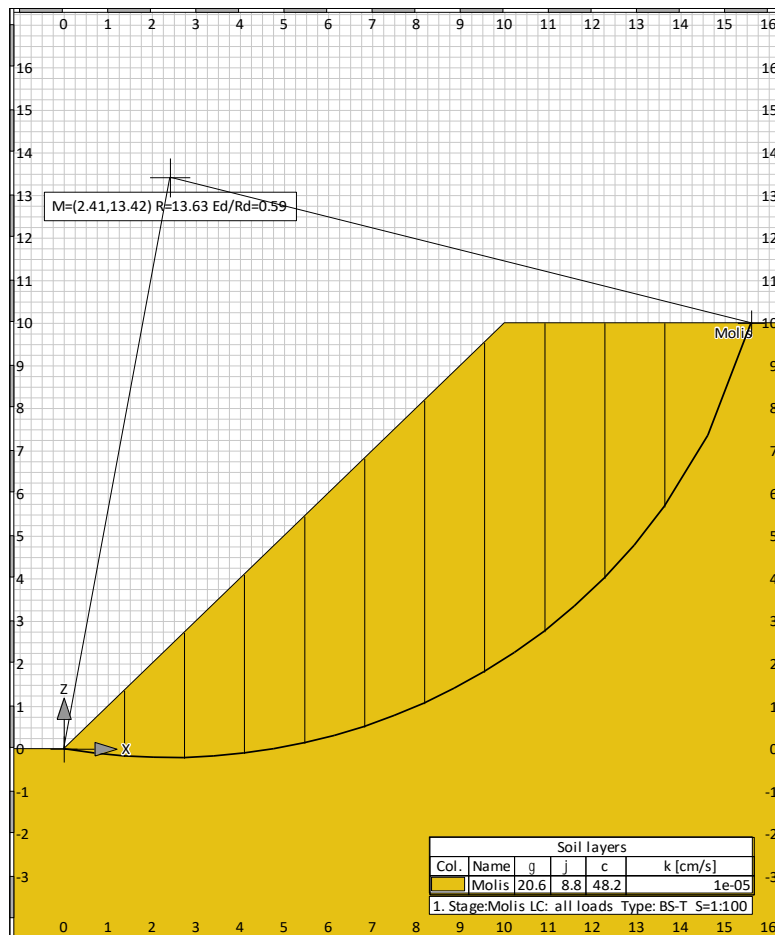
Išanalizavus 18 lentelėje pateiktų parametrų optimalių geopolimerų kiekio rezultatus, galima pastebėti, kad bandymais optimalios kiekių reikšmės nebuvo pasiektos. Atžvelgiant į geopolimerų įterpimo specifiką, galima daryti išvadą, kad optimalių reikšmių praktiškai pasiekti nėra galimybės (nėra pakankamai ploto padidinti skylių skaičiaus).

4.2. Šlaitų stabilumo analizė kompiuterine programa

Šlaitų stabilumo modeliavimo skaičiavimai atlikti šlaitui, kurio posvyrio kampas: $\beta = 45^\circ$, naudojant kompiuterio programos „Fides DV-Partner“ paprogramį „Fides SlipCircle“. Programos skaičiuotiniai variantai suformuojami: braižant grunto sluoksnių geometriją ir šlaito geometriją, tai pat šiems grunto sluoksniams iš karto priskiriamos grunto skaičiuotinės charakteristikos. Suformuotos vienos iš skaičiuojamųjų variantų schemas pavyzdys pateiktas 32 paveiksle. Kitos skaičiuojamosios schemas pateiktos 1 priede.

Analizuojamų variantų schemas apskaičiuojamos padalinimo metodu, kuris aprašytas 2.1.8. skyrelyje. Gauti variantų vertikalių jėgų rezultatai su suskirstytų segmentų geometriniais parametrais, pateikti 2 priede.

Skaičiuojamųjų variantų pavadinimus su aprašymais galima rasti 19 lentelėje. Variantų schemų įvesties parametrai pateikti 20 lentelėje.



32 pav. Skaičiuotinio varianto schema „Molis“

19 lentelė. Stabilumo analizės variantų pavadinimai su aprašymais.

Eil. Nr.	Varianto pavadinimas	Varianto aprašymas
1	„Molis“	Molis šlaitas
2	„Molis + įm“	Įmirkęs molis šlaitas
3	„Molis + F“	Pridėta papildoma išorinė apkrova ties molis šlaito kritiniu slinkimo paviršiumi
4	„Molis + F + įm“	Pridėta papildoma išorinė apkrova ties įmirkusi molis šlaito kritiniu slinkimo paviršiumi
5	„Molis + 2m“	Pridėta papildoma išorinė apkrova, kuri perstumta 2 m horizontalia kryptimi nuo molinio šlaito kritinio slinkimo paviršiaus
6	„Molis + 2m + įm“	Pridėta papildoma išorinė apkrova, kuri perstumta 2 m horizontalia kryptimi nuo įmirkusio molinio šlaito kritinio slinkimo paviršiaus
7	„Molis + 3C“	Molis šlaitas sustiprintas su šlakiniais geopolimerai (6-7 %)
8	„Molis + 3C + įm“	Įmirkęs molis šlaitas sustiprintas su šlakiniais geopolimerai (6-7 %)
9	„Molis + 3C + F“	Pridėta papildoma išorinė apkrova ties molis šlaito, sustiprinto šlakiniais geopolimerai (6-7 %), kritiniu slinkimo paviršiumi
10	„Molis + 3C + F + įm“	Pridėta papildoma išorinė apkrova ties įmirkusi molis šlaito, sustiprinto šlakiniais geopolimerai (6-7 %), kritiniu slinkimo paviršiumi
11	„Molis + 3C + F + 2m“	Pridėta papildoma išorinė apkrova, kuri perstumta 2 m horizontalia kryptimi nuo molinio šlaito, sustiprinto šlakiniais geopolimerai (6-7 %), kritinio slinkimo paviršiaus
12	„Molis + 3C + F + 2m + įm“	Pridėta papildoma išorinė apkrova, kuri perstumta 2 m horizontalia kryptimi nuo įmirkusio molinio šlaito, sustiprinto šlakiniais geopolimerai (6-7 %), kritinio slinkimo paviršiaus

20 lentelė. Skaičiuotinių variantų schemų įvesties parametrai.

Eil. Nr.	Varianto pavadinimas	Geopolimerų kiekis molyje, %	$\varphi, ^\circ$	Sankiba c, kPa	Tankis, kg/m^3	Vienetinis svoris kN/m^3	Apkrova kN/m
$\beta = 45^\circ$							
1	„Molis“	0	8,77	48,19	2097	20,57	-
2	„Molis + įm“	0	0	48,19	2097	20,57	-
3	„Molis + F“	0	8,77	48,19	2097	20,57	500
4	„Molis + F + įm“	0	0	48,19	2097	20,57	500
5	„Molis + 2m“	0	8,77	48,19	2097	20,57	500
6	„Molis + 2m + įm“	0	0	48,19	2097	20,57	500
7	„Molis + 3C“	6,26	11,08	62,36	2093	20,53	-
8	„Molis + 3C + įm“	6,26	0	62,36	2093	20,53	-
9	„Molis + 3C + F“	6,26	11,08	62,36	2093	20,53	500
10	„Molis + 3C + F + įm“	6,26	0	62,36	2093	20,53	500
11	„Molis + 3C + F + 2m“	6,26	11,08	62,36	2093	20,53	500
12	„Molis + 3C + F + 2m + įm“	6,26	0	62,36	2093	20,53	500

Programa automatiškai nustato pavojingiausio slydimo paviršiaus centrą ir pateikia programoje naudojamą stabilumo parametą μ . Iš šio gauto parametro apskaičiuojamas stabilumo veiksnys pagal 23 formulę. Gautos, skirtingų variantų, reikšmės pateiktos 21 lentelėje.

$$F_s = \frac{1}{\mu};$$

F_s – stabilumo veiksnys;

μ – programos stabilumo parametras.

21 lentelė. Stabilumo analizės rezultatai.

Eil. Nr.	Varianto pavadinimas	μ (programos stabilumo parametras)	F_s (stabilumo veiksnys)
1	„Molis“	0,59	1,69
2	„Molis + įm“	0,80	1,25
3	„Molis + F“	0,89	1,12
4	„Molis + F + įm“	1,22	0,82
5	„Molis + 2m“	0,84	1,19
6	„Molis + 2m + įm“	1,14	0,88
7	„Molis + 3C“	0,46	2,17
8	„Molis + 3C + įm“	0,62	1,61
9	„Molis + 3C + F“	0,69	1,44
10	„Molis + 3C + F + įm“	0,94	1,06
11	„Molis + 3C + F + 2m“	0,65	1,54
12	„Molis + 3C + F + 2m + įm“	0,88	1,14

Gauto stabilumo veiksnio F_s reikšmės iš 21 lentelės su atitinkamais variantais patalpintos 22 lentelėje taip, kad būtų galima matyti vienoje eilutėje sustiprinto ir nesusistiprinto šlaito stabilumo veiksnio reikšmės. Iš šių stabilumo veiksnio reikšmių apskaičiuojama sustiprinto šlaito laikomosios galios padidėjimo procentinė reikšmė. Ši procentinė reikšmė rodo, kad atitinkamuose variantuose destabilizuojančios jėgos yra vienodos, bet padidėja pačio šlaito laikomoji galia. Iš 22 lentelės duomenų galima daryti išvadą, kad įterpus į šlaitą 6-7% šlakinių geopolimerų šlaito pastovumas padidėtų 28 %.

22 lentelė. Stabilumo analizės veiksnio F_s palyginimas.

Eil. Nr.	Varianto pavadinimas	Sustiprinto šlaito stabilumo veiksnys F_s	Varianto pavadinimas	Nestiprinto šlaito stabilumo veiksnys F_s	Stabilumo veiksnio F_s padidėjimas, %
1	„Molis + 3C“	2,17	„Molis“	1,69	28,4
2	„Molis + 3C + įm“	1,61	„Molis + įm“	1,25	28,8
3	„Molis + 3C + F“	1,44	„Molis + F“	1,12	28,6
4	„Molis + 3C + F + įm“	1,06	„Molis + F + įm“	0,82	29,3
5	„Molis + 3C + F + 2m“	1,54	„Molis + 2m“	1,19	29,4
6	„Molis + 3C + F + 2m + įm“	1,14	„Molis + 2m + įm“	0,88	29,5

IŠVADOS

1. Tyrime naudotas molis, kurio drėgnis 25,1-27,0 %; jo sausasis tankis 1,63-1,72 Mg/m^3 ; konsistencijos rodiklis $I_c = 1,04 \div 1,15$ arba, kitaip tariant, molis labai standžios konsistencijos.

2. Sustiprinto šlakiniiais geopolimerais molio kerpamasis stipris vidutiniškai didėja apie 4% pridėjus 1% geopolimerų. Tačiau efektyviausiai šlakiniai geopolimerai sustiprina molį, kuriame jų kiekis yra santykinai nedidelis 6-7 %. Esant tokiam geopolimerų kiekiui molyje, jo kerpamasis stipris didėja 5% įterpus 1% šlakinių geopolimerų arba bendrai 30-35%.

3. Nustatyta, kad molio stipris, vidinės trinties kampas, sankiba kinta pagal kreives nusakomas kvadratinėmis lygtimis, priklausančiomis nuo šlakinių geopolimerų kiekio molyje. Šių priklausomybių diagramos pateiktos 31 paveiksle, jose galima nustatyti reikalingą šlakinių geopolimerų kiekį, norint gauti atitinkamą parametro reikšmę arba apsiskaičiuoti parametrus pagal funkcijas, kurių koeficientai pateikti 18 lentelėje.

4 Apskaičiavus reikiamus geopolimerų kiekius pagal stiprumo parametrų priklausomybes, sudaromos prielaidos optimizavimo uždavinio formulavimui pagal užsiduotą tikslo funkciją, pavyzdžiui, šlaito stabilumo parametą.

5. Ištyrus molio sustiprinto šlakiniiais geopolimerais eksperimentinių rezultatų naudojimo galimybes programos „Fides DV-Partner“ aplinkoje, galima teigti, kad sustiprinto geopolimerų cilindriniais poliais šlaito gruntą galima modeliuoti kaip vientisą terpę su parametrais, nustatytais pagal gautas empirines kreives.

6. Sumodeliuoto natūralaus šlaito ($H=10\text{ m}$; $\beta=45^\circ$) stabilumo apskaičiavimo pokyčiai rodo, kad jo sustiprinimas 6-7% šlakinių geopolimerų cilindriniais poliais, padidina stabilumą 28%.

LITERATŪRA

1. PROVIS, John L.; and Van Deventer, Jan Stephanus Jakob. *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. Elsevier, 2009.
2. MCLELLAN, Benjamin C., et al. Costs and Carbon Emissions for Geopolymer Pastes in Comparison to Ordinary Portland Cement. *Journal of Cleaner Production*, 2011, vol. 19, no. 9-10. pp. 1080-1090.
3. DAVIDOVITS, Joseph. *Geopolymer Chemistry and Applications*. Geopolymer Institute, 2008.
4. DAVIDOVITS, Joseph. *Geopolymer Chemistry and Properties*. Compiègne, France ed. , 1988.
5. VAN JAARVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J. and LORENZEN, L. *The Potential use of Geopolymeric Materials to Immobilise Toxic Metals: Part I. Theory and Applications*. , July 1997, 1997. Available from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687597000460>>. ISBN 0892-6875.
6. FENG, Dingwu; PROVIS, John L. and DEVENTER, Jannie SJ. Thermal Activation of Albite for the Synthesis of One-Part Mix Geopolymers. *Journal of the American Ceramic Society*, 2012, vol. 95, no. 2. pp. 565-572.
7. PALOMO, A., et al. *Physical, Chemical and Mechanical Characterisation of Geopolymers*. , 1992.
8. XU, Hua; and VAN DEVENTER, JSJ. The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 2000, vol. 59, no. 3. pp. 247-266.
9. COMRIE, D. C.; and DAVIDOVITS, J. *Long Term Durability of Hazardous Toxic and Nuclear Waste Disposals*. Compiègne, France ed. , 1988.
10. GLUKHOVSKY, VD. *Soil Silicates*. Gostroiizdat Publish. Kiev, USSR, 1959.
11. FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, Ana; PALOMO, A. and CRIADO, M. Microstructure Development of Alkali-Activated Fly Ash Cement: A Descriptive Model. *Cement and Concrete Research*, 2005, vol. 35, no. 6. pp. 1204-1209.
12. FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, Ana, et al. The Role Played by the Reactive Alumina Content in the Alkaline Activation of Fly Ashes. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2006, vol. 91, no. 1. pp. 111-119.
13. PROVIS, John L.; LUKEY, Grant C. and VAN DEVENTER, Jannie SJ. Do Geopolymers Actually Contain Nanocrystalline Zeolites? A Reexamination of Existing Results. *Chemistry of Materials*, 2005, vol. 17, no. 12. pp. 3075-3085.
14. BLUM, Alex; and LASAGA, Antonio. Role of Surface Speciation in the Low-Temperature Dissolution of Minerals. *Nature*, 1988, vol. 331, no. 6155. pp. 431-433.
15. OELKERS, Eric H. General Kinetic Description of Multioxide Silicate Mineral and Glass Dissolution. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2001, vol. 65, no. 21. pp. 3703-3719.
16. WALTHER, John V. Relation between Rates of Aluminosilicate Mineral Dissolution, pH, Temperature, and Surface Charge. *American Journal of Science*, 1996, vol. 296, no. 7. pp. 693-728.
17. SMITH, J. V. Atmospheric Weathering and Silica-Coated Feldspar: Analogy with Zeolite Molecular Sieves, Granite Weathering, Soil Formation, Ornamental Slabs, and Ceramics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Mar 31, 1998, vol. 95, no. 7. pp. 3366-3369. ISSN 0027-8424; 0027-8424.
18. SWADDLE, Thomas W.; SALERNO, Julian and TREGLOAN, Peter A. Aqueous Aluminates, Silicates, and Aluminosilicates. *Chemical Society Reviews*, 1994, vol. 23, no. 5. pp. 319-325.
19. SWADDLE, Thomas W. Silicate Complexes of Aluminum (III) in Aqueous Systems. *Coordination Chemistry Reviews*, 2001, vol. 219. pp. 665-686.

20. AIELLO, Rosario, et al. Influence of Cations on the Physicochemical and Structural Properties of Aluminosilicate Gel Precursors. Part 1. Chemical and Thermal Properties. *Zeolites*, 1991, vol. 11, no. 8. pp. 767-775.
21. IVANOVA, II, et al. Influence of Cations on the Physicochemical and Structural Properties of Aluminosilicate Gel Precursors: II. Multinuclear Magnetic Resonance Characterization. *Microporous Materials*, 1994, vol. 3, no. 3. pp. 245-257.
22. FAIMON, J. Oscillatory Silicon and Aluminum Aqueous Concentrations during Experimental Aluminosilicate Weathering. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1996, vol. 60, no. 15. pp. 2901-2907.
23. DUXSON, Peter, et al. Understanding the Relationship between Geopolymer Composition, Microstructure and Mechanical Properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2005, vol. 269, no. 1. pp. 47-58.
24. WARD, Colin R. Minerals in Bituminous Coals of the Sydney Basin (Australia) and the Illinois Basin (USA). *International Journal of Coal Geology*, 1989, vol. 13, no. 1. pp. 455-479.
25. XU, Hua; and VAN DEVENTER, JSJ. The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 2000, vol. 59, no. 3. pp. 247-266.
26. TSUYUKI, Naomitsu; and KOIZUMI, Koshiro. Granularity and Surface Structure of Ground Granulated Blast-Furnace Slags. *Journal of the American Ceramic Society*, 1999, vol. 82, no. 8. pp. 2188-2192.
27. PROVIS, John L.; and Van Deventer, Jan Stephanus Jakob. *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. Elsevier, 2009.
28. DUXSON, Peter; and PROVIS, John L. Designing Precursors for Geopolymer Cements. *Journal of the American Ceramic Society*, 2008, vol. 91, no. 12. pp. 3864-3869.
29. SHI, Caijun; ROY, Dellaand KRIVENKO, Pavel. *Alkali-Activated Cements and Concretes*. CRC press, 2006.
30. KEYTE, Louise M.; LUKEY, Grant C. and VAN DEVENTER, Jannie SJ. The Effect of Coal Ash Glass Chemistry on the Tailored Design of Waste-Based Geopolymeric Products. *WasteEng, CD-ROM Proceedings, Albi, France*, 2005.
31. ROY, Amitava; SCHILLING, Paul J. and EATON, Harvill C. *Alkali Activated Class C Fly Ash Cement*, 1996.
32. PERERA, Dan S., et al. *Geopolymers made using New Zealand Flyash*. The Ceramic Society of Japan, 2004.
33. CHINDAPRASIRT, P.; CHAREERAT, T. and SIRIVIVATNANON, Vute. Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 2007, vol. 29, no. 3. pp. 224-229.
34. PUERTAS, F., et al. Alkali-Activated Fly Ash/Slag Cements: Strength Behaviour and Hydration Products. *Cement and Concrete Research*, 2000, vol. 30, no. 10. pp. 1625-1632.
35. GORETTA, KC, et al. Solid-Particle Erosion of a Geopolymer Containing Fly Ash and Blast-Furnace Slag. *Wear*, 2004, vol. 256, no. 7. pp. 714-719.
36. LI, Zongjin; and LIU, Sifeng. Influence of Slag as Additive on Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, vol. 19, no. 6. pp. 470-474.
37. MONNIN, Christophe; and DUBOIS, Michel. Thermodynamics of the LiOH H₂O System. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2005, vol. 50, no. 4. pp. 1109-1113.
38. GABORIAUD, Fabien, et al. ²⁹Si NMR and Small-Angle X-Ray Scattering Studies of the Effect of Alkaline Ions (Li, Na, and K) in Silico-Alkaline Sols. *The Journal of Physical Chemistry B*, 1999, vol. 103, no. 12. pp. 2091-2099.
39. LUMLEY, JS. ASR Suppression by Lithium Compounds. *Cement and Concrete Research*, 1997, vol. 27, no. 2. pp. 235-244.
40. LI, Ke L., et al. *Study on Abilities of Mineral Admixtures and Geopolymer to Restrain ASR*. Trans Tech Publ, 2006.

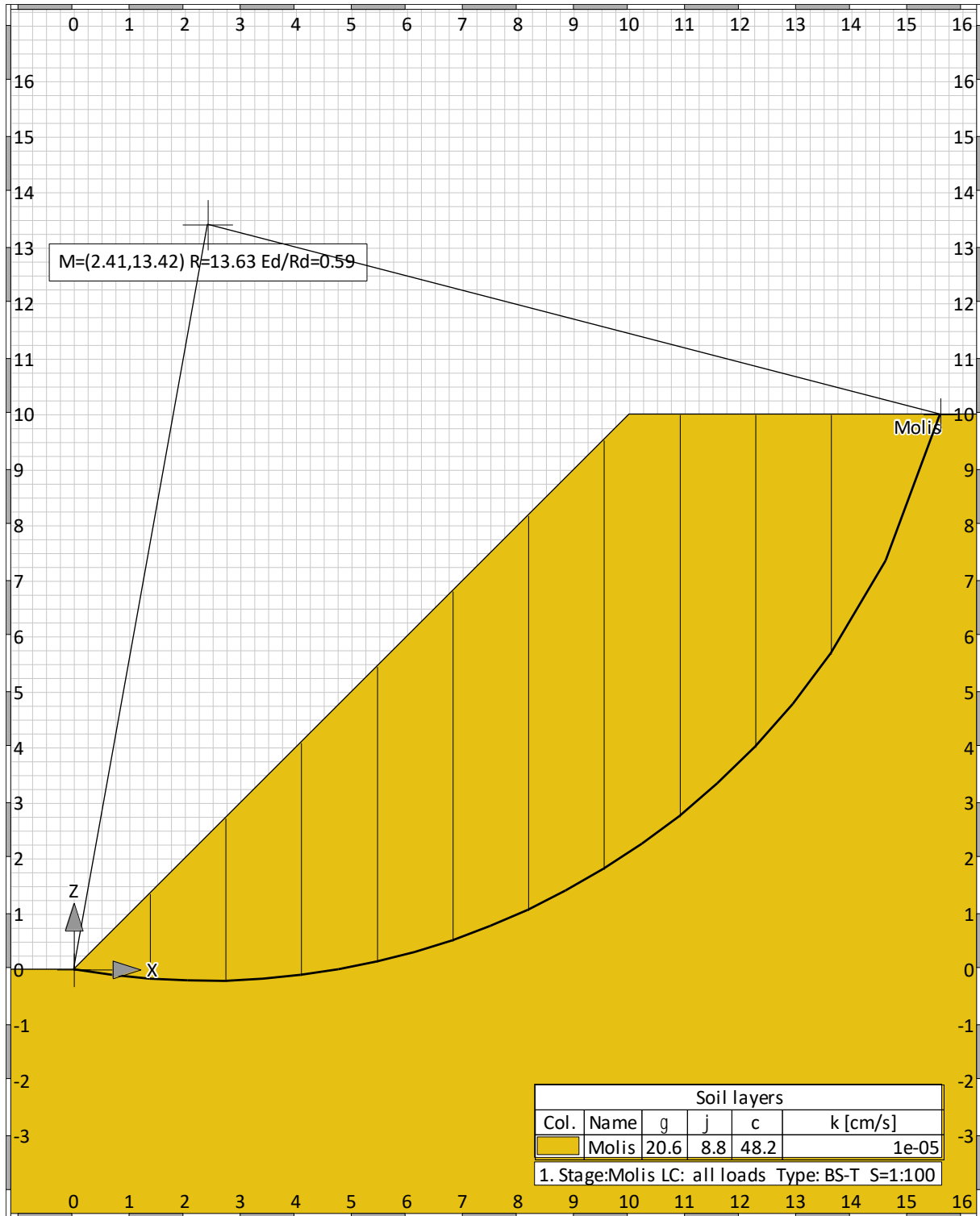
41. GARCÍA-LODEIRO, I.; PALOMO, A. and FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, Ana. Alkali–aggregate Reaction in Activated Fly Ash Systems. *Cement and Concrete Research*, 2007, vol. 37, no. 2. pp. 175-183.
42. PABALAN, Roberto T.; and PITZER, Kenneth S. Thermodynamics of NaOH (Aq) in Hydrothermal Solutions. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1987, vol. 51, no. 4. pp. 829-837.
43. SIMONSON, JM; MESMER, RE and ROGERS, PSZ. The Enthalpy of Dilution and Apparent Molar Heat Capacity of NaOH (Aq) to 523 K and 40 MPa. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 1989, vol. 21, no. 6. pp. 561-584.
44. PETRENKO, Sergey V.; and PITZER, Kenneth S. Thermodynamics of Aqueous NaOH Over the Complete Composition Range and to 523 K and 400 MPa. *The Journal of Physical Chemistry B*, 1997, vol. 101, no. 18. pp. 3589-3595.
45. PICKERING, Spencer Umfreville. LXI.—The Hydrates of Sodium, Potassium, and Lithium Hydroxides. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 1893, vol. 63. pp. 890-909.
46. KURT, C.; and BITTNER, J. Sodium Hydroxide in Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry. 2007.
47. GURVICH, LV, et al. Thermodynamic Properties of Alkali Metal Hydroxides. Part II. Potassium, Rubidium, and Cesium Hydroxides. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1997, vol. 26, no. 4. pp. 1031-1110.
48. LENK, Winfried; and PRINZ, Horst. Rubidium and Rubidium Compounds. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 2010.
49. KRIVEN, WM; KELLY, CA and COMRIE, DC. Geopolymers for Structural Ceramic Applications. *Air Force Office of Scientific Research Report FA9550-04-C-0063*, 2006.
50. BICK, Manfred; and PRINZ, Horst. Cesium and Cesium Compounds. *Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 2002.
51. ZHANG, Mo, et al. Experimental Feasibility Study of Geopolymer as the Next-Generation Soil Stabilizer. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 47. pp. 1468-1478.
52. VERDOLOTTI, Letizia, et al. Geopolymerization Reaction to Consolidate Incoherent Pozzolan Soil. *Journal of Materials Science*, 2008, vol. 43, no. 3. pp. 865-873.
53. CRISTELO, Nuno; GLENDINNING, Stephanie and TEIXEIRA PINTO, Amândio. Deep Soft Soil Improvement by Alkaline Activation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Ground Improvement*, 2011, vol. 164, no. 2. pp. 73-82.
54. CRISTELO, Nuno, et al. Effect of Calcium Content on Soil Stabilisation with Alkaline Activation. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 29. pp. 167-174.
55. PHETCHUAY, Chayakrit, et al. Calcium Carbide Residue: Alkaline Activator for Clay–fly Ash Geopolymer. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 69. pp. 285-294.
56. BOSE, Bidula. Geo Engineering Properties of Expansive Soil Stabilized with Fly Ash. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, vol. 17. pp. 1339-1353.
57. PHETCHUAY, Chayakrit, et al. Calcium Carbide Residue: Alkaline Activator for Clay–fly Ash Geopolymer. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 69. pp. 285-294.
58. KAMPALA, Apichit, et al. Influence of Wet-Dry Cycles on Compressive Strength of Calcium Carbide Residue–fly Ash Stabilized Clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, vol. 26, no. 4. pp. 633-643.
59. HORPIBULSUK, Suksun; PHETCHUAY, Chayakrit and CHINKULKIJNIWAT, Avirut. Soil Stabilization by Calcium Carbide Residue and Fly Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, vol. 24, no. 2. pp. 184-193.
60. YI, Yaolin; LI, Cheng and LIU, Songyu. Alkali-Activated Ground-Granulated Blast Furnace Slag for Stabilization of Marine Soft Clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, vol. 27, no. 4. pp. 04014146.
61. MOZUMDER, Ruhul Amin; and LASKAR, Aminul Islam. Prediction of Unconfined Compressive Strength of Geopolymer Stabilized Clayey Soil using Artificial Neural Network. *Computers and Geotechnics*, 2015, vol. 69. pp. 291-300.

62. YI, Yaolin, et al. Carbide Slag–activated Ground Granulated Blastfurnace Slag for Soft Clay Stabilization. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, vol. 52, no. 5. pp. 656-663.
63. GU, Kai, et al. Ground Improvement and Geosynthetics, 2014. *Initial Investigation of Soil Stabilization with Calcined Dolomite-GGBS Blends*, pp. 148-157.
64. CHEN, Li; CHUAN, Sunand SONGYU, Liu. The Effects of GGBS on the Engineering Properties of Stabilized Soil. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2013. pp. S2.
65. BO, Yu-lin, et al. Effect of Wetting-Drying Cycles on Strength Properties of Ground Granulated Blast-Furnace Slag and Magnesium Oxide-Stabilized Soft Clay. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013. pp. S1.
66. SARVADE, Purushotham G.; SWAMY, Rangaand DEEPAK, Nayak. Utilization of GGBS to Improve the Compaction and Unconfined Strength Properties of Marine Clay, 2015.
67. ŠIAUČIŪNAS, R.; and VALANČIENĖ, V. The Colouring of Clay Body with Industrial Waste Materials. *Statyba*, 2001, vol. 7, no. 6. pp. 453-461.
68. VAIČIUKYNIENĖ, D., et al. Effect of Phosphogypsum on the Stability upon Firing Treatment of Alkali-Activated Slag. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 184. pp. 485-491.
69. DOROŠEVAS, V.; and STELMOKAITIS, G. *Gruntų Mechanikos Laboratoriniai Darbai [Soil Mechanics Laboratory Testing Manual]*, Vilnius: VPU Leidykla.80 P, 2011.
70. SLIŽYTĖ, D.; MEDZVIECKAS, J.and MACKEVIČIUS, R. Pamatai Ir Pagrindai. Vilnius „Technika“, 2012.
71. DOROŠEVAS, Viktoras. *Trumpas Gruntų Mechanikos Kursas : Vadovėlis*. Kaunas: Vitae Litera, 2017. ISBN 9786094543159.
72. DAS, Braja M.; and SOBHAN, Khaled. *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage learning, 2013.

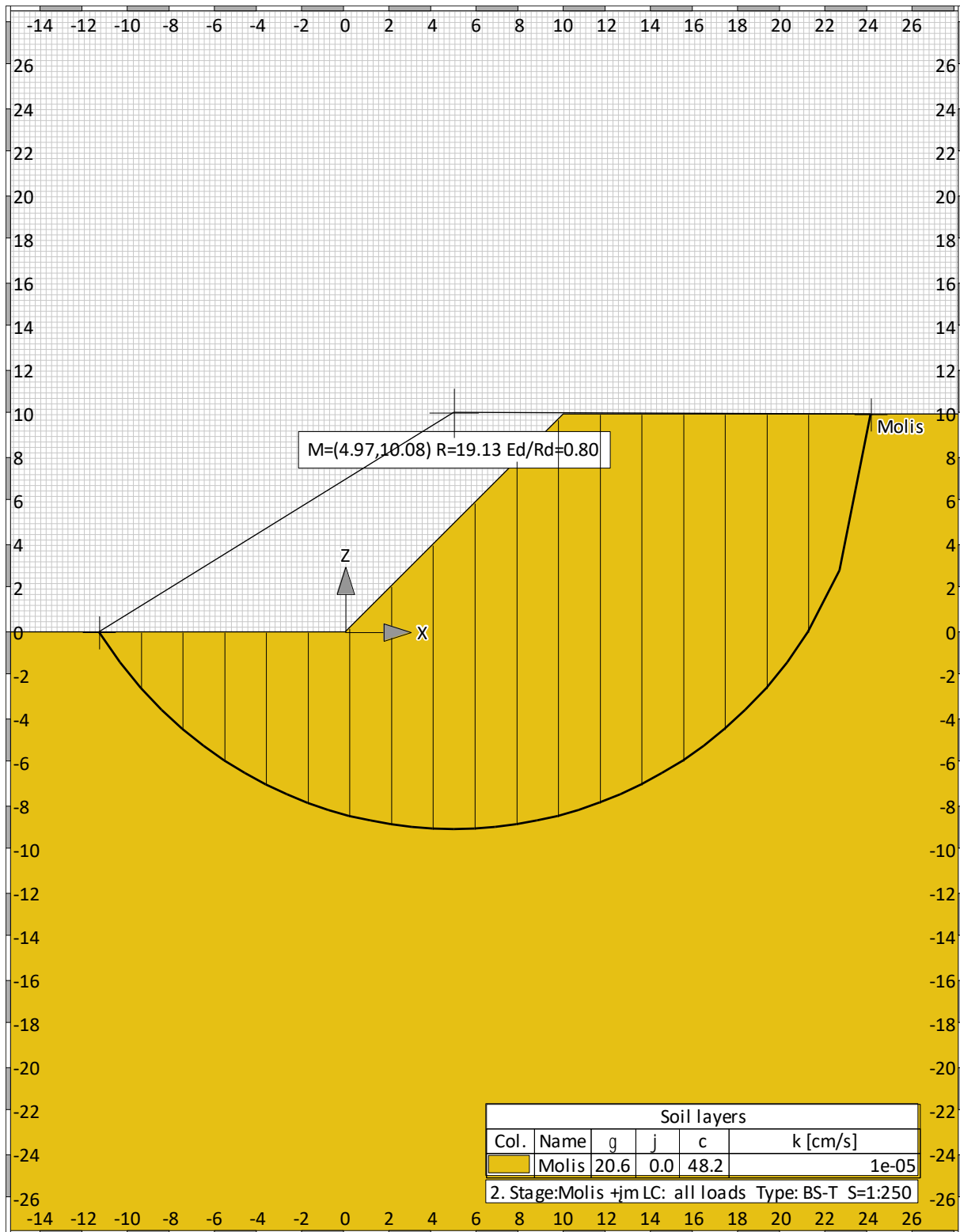
PRIEDAI

1 Priedas. Skaičiuojamosios schemos (H=10 m; $\beta=45^\circ$)

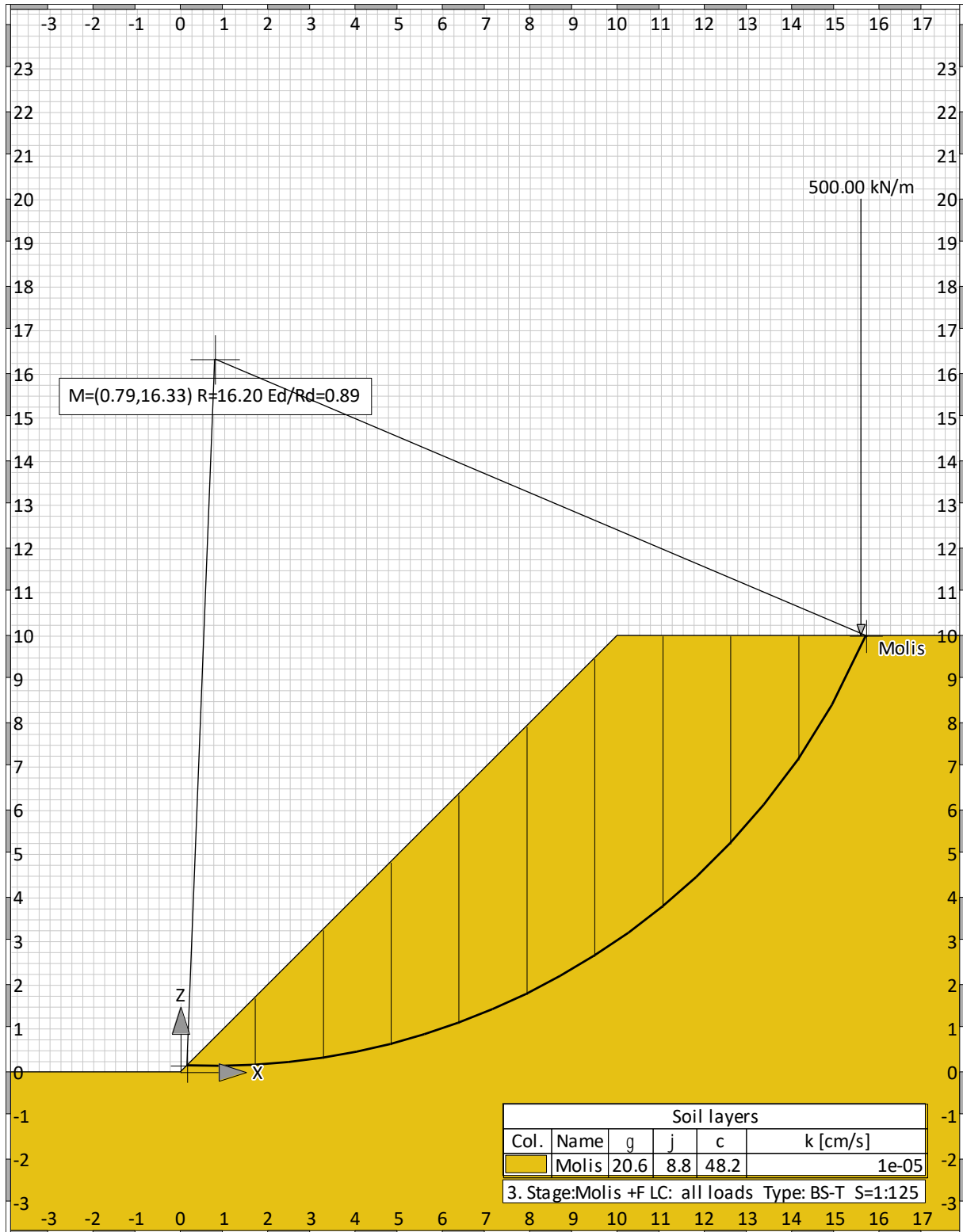
Variantas – „Molis“:



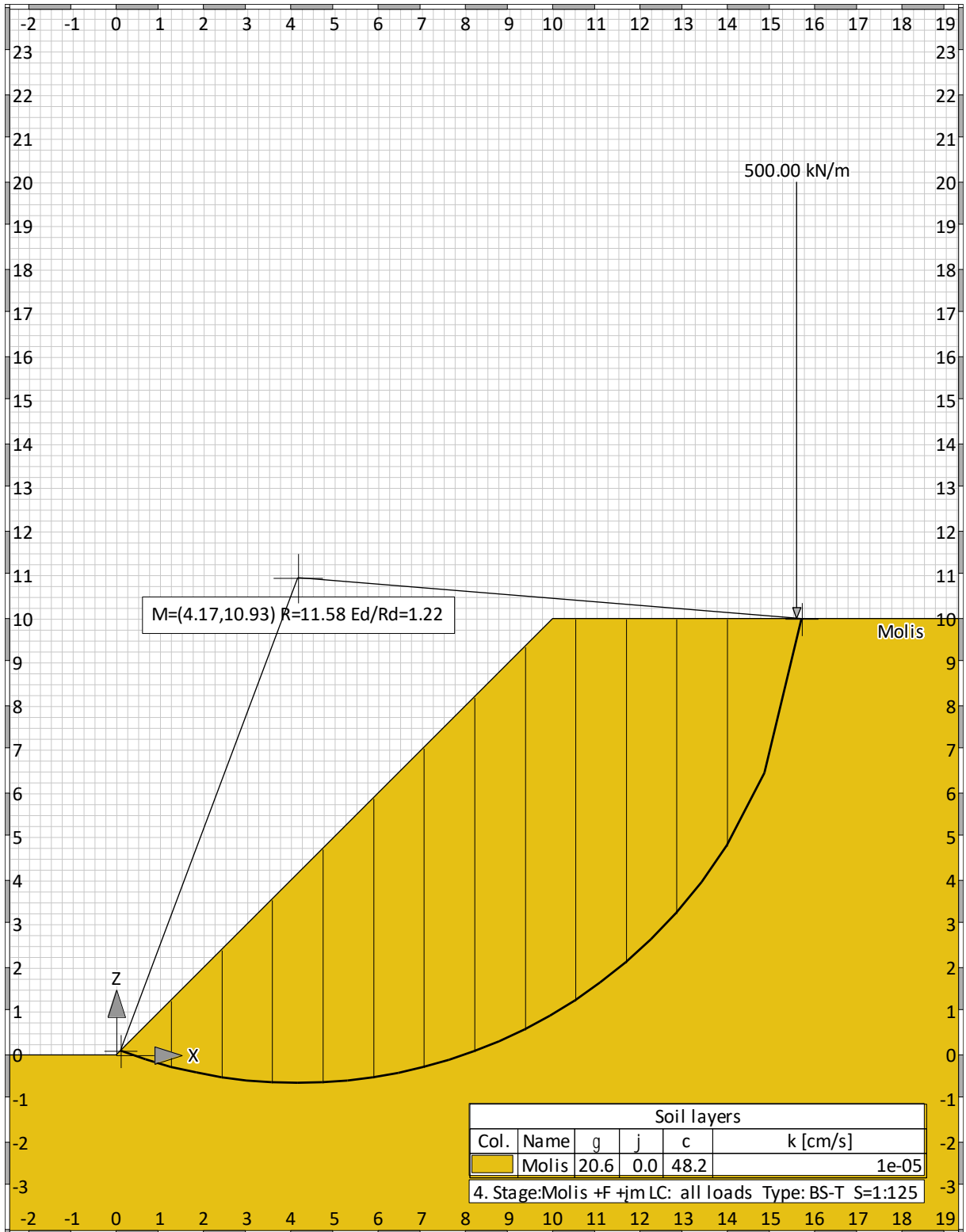
Variantas – „Molis + įm“:



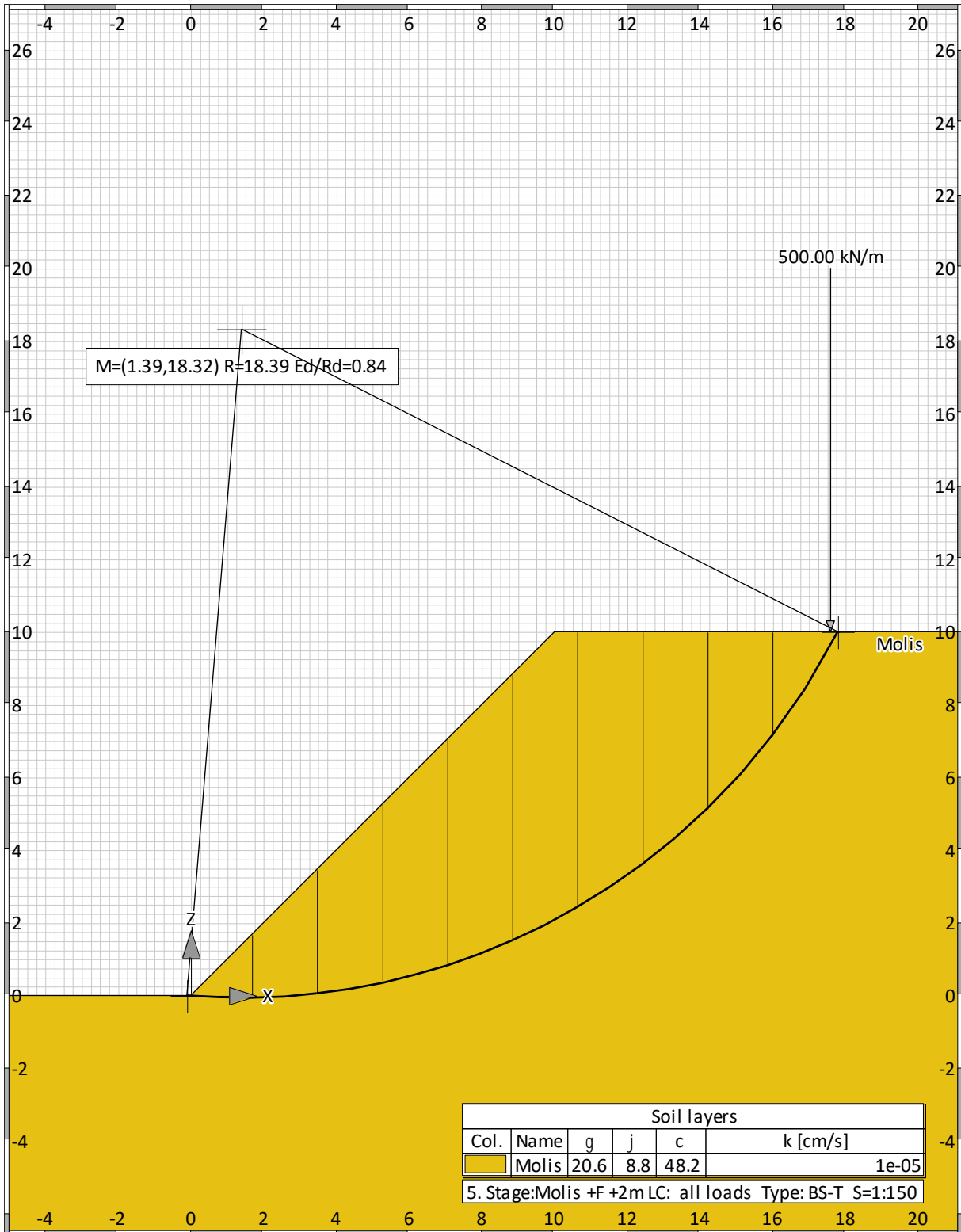
Variantas – „Molis + F“:



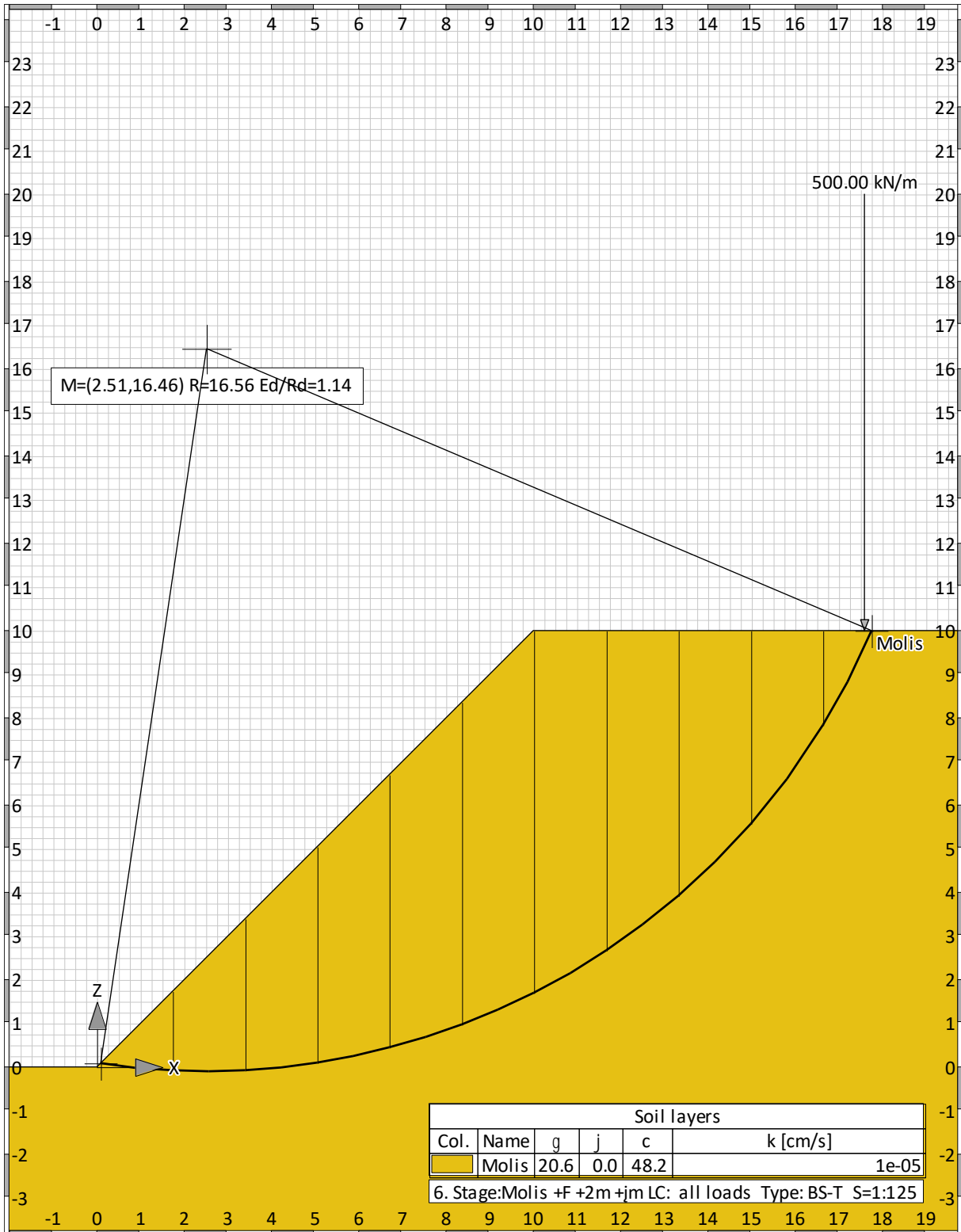
Variantas – „Molis + F + jm“:



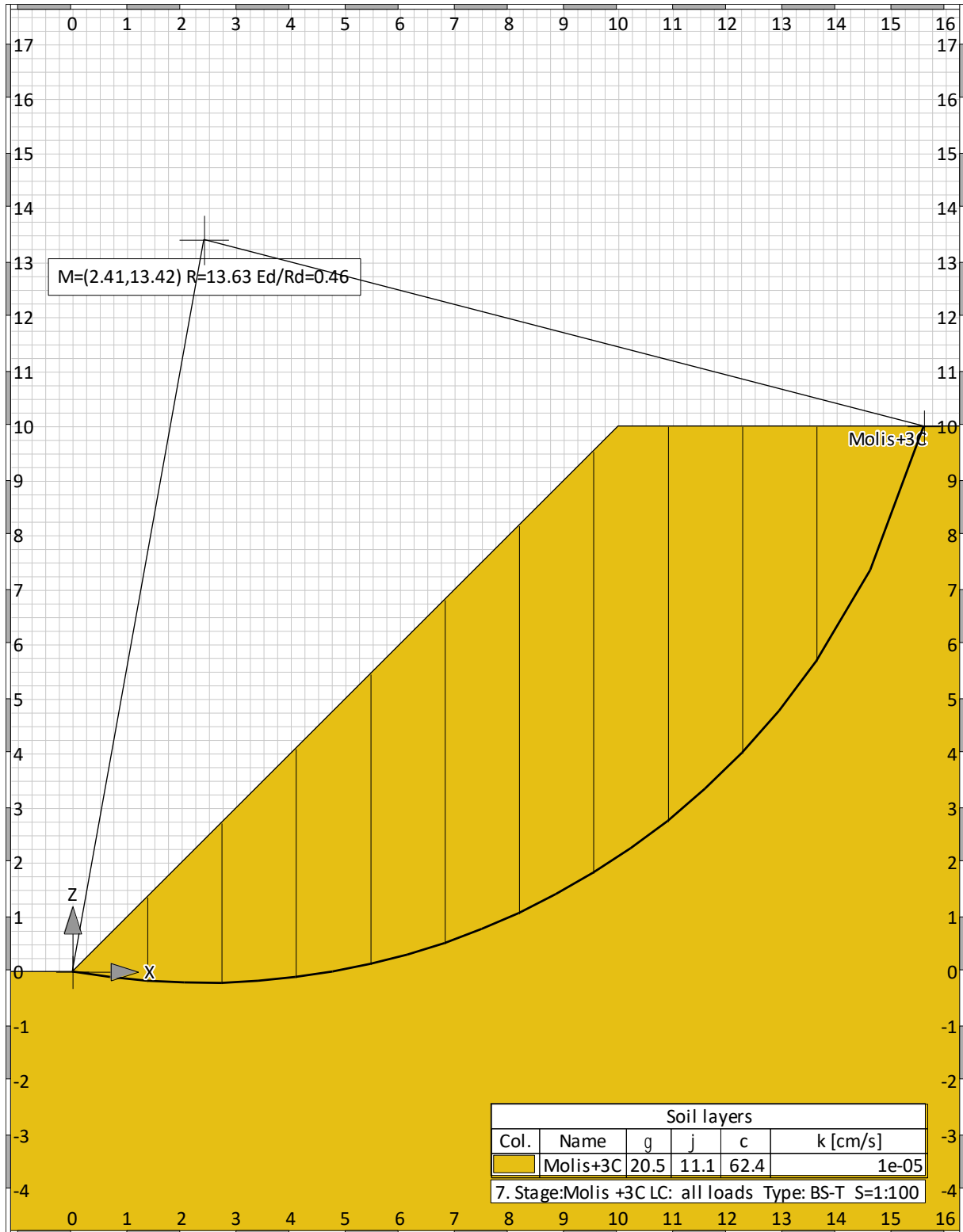
Variantas – „Molis + F + 2m“:



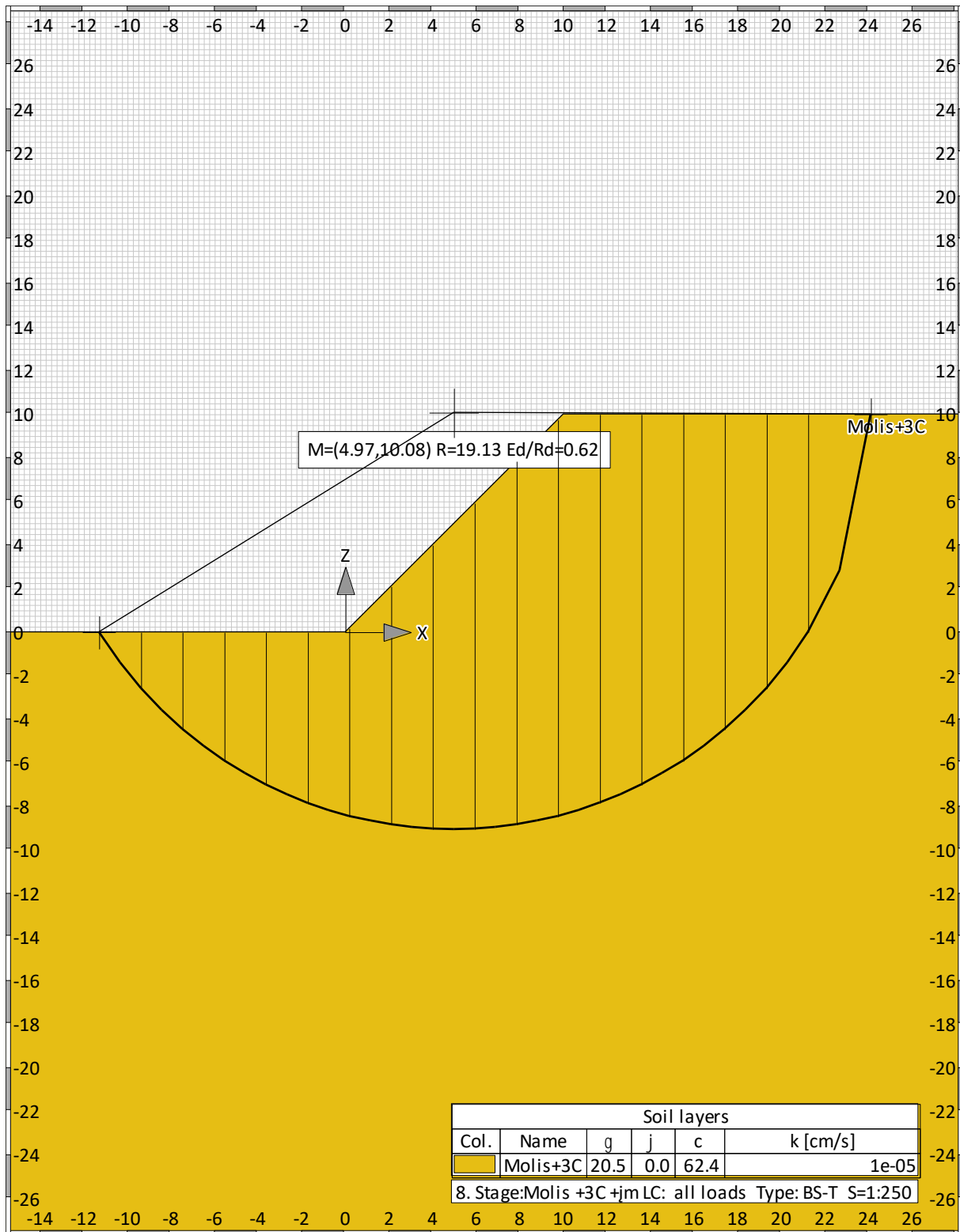
Variantas – „Molis + F + 2m + jm“:



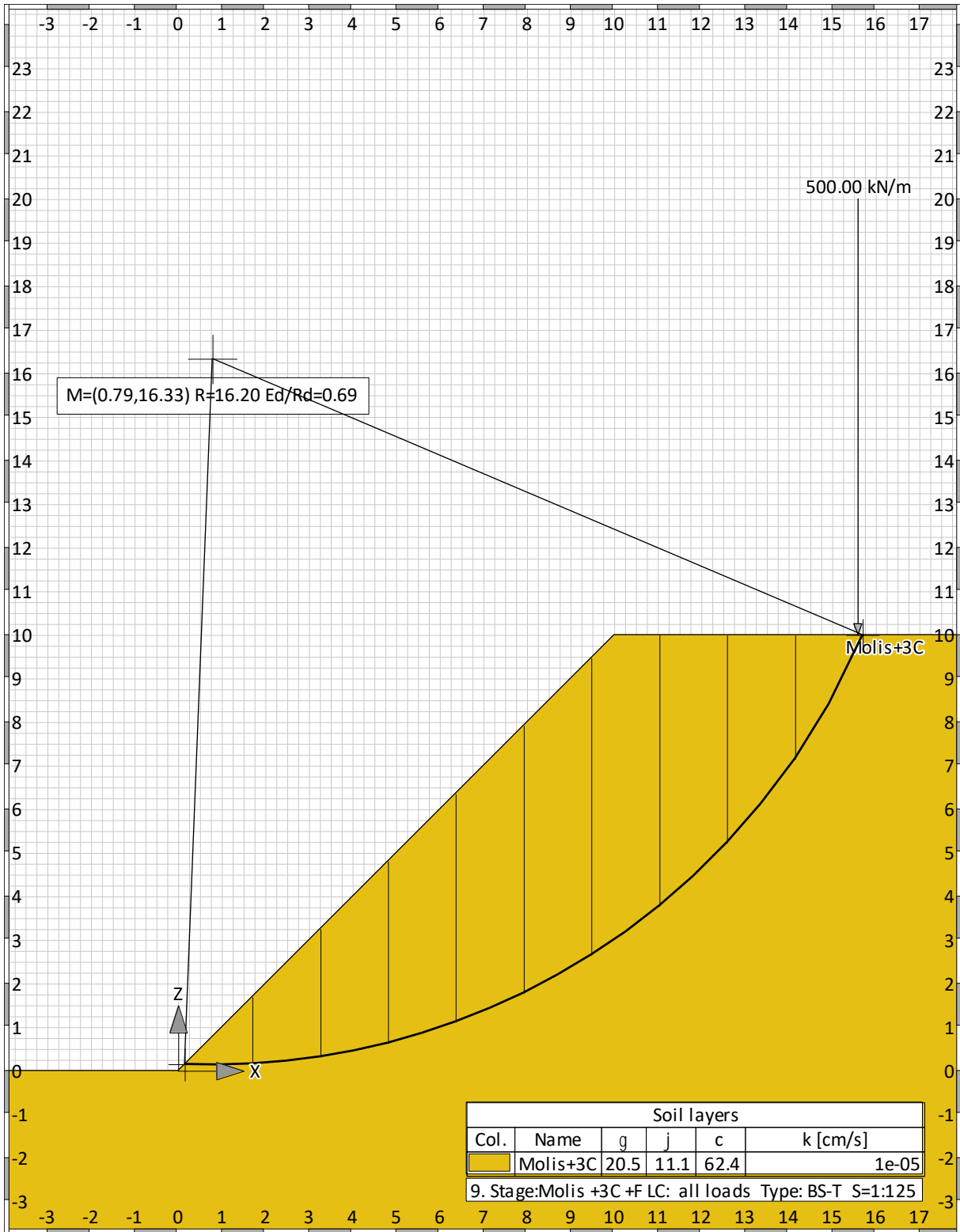
Variantas – „Molis + 3C“:



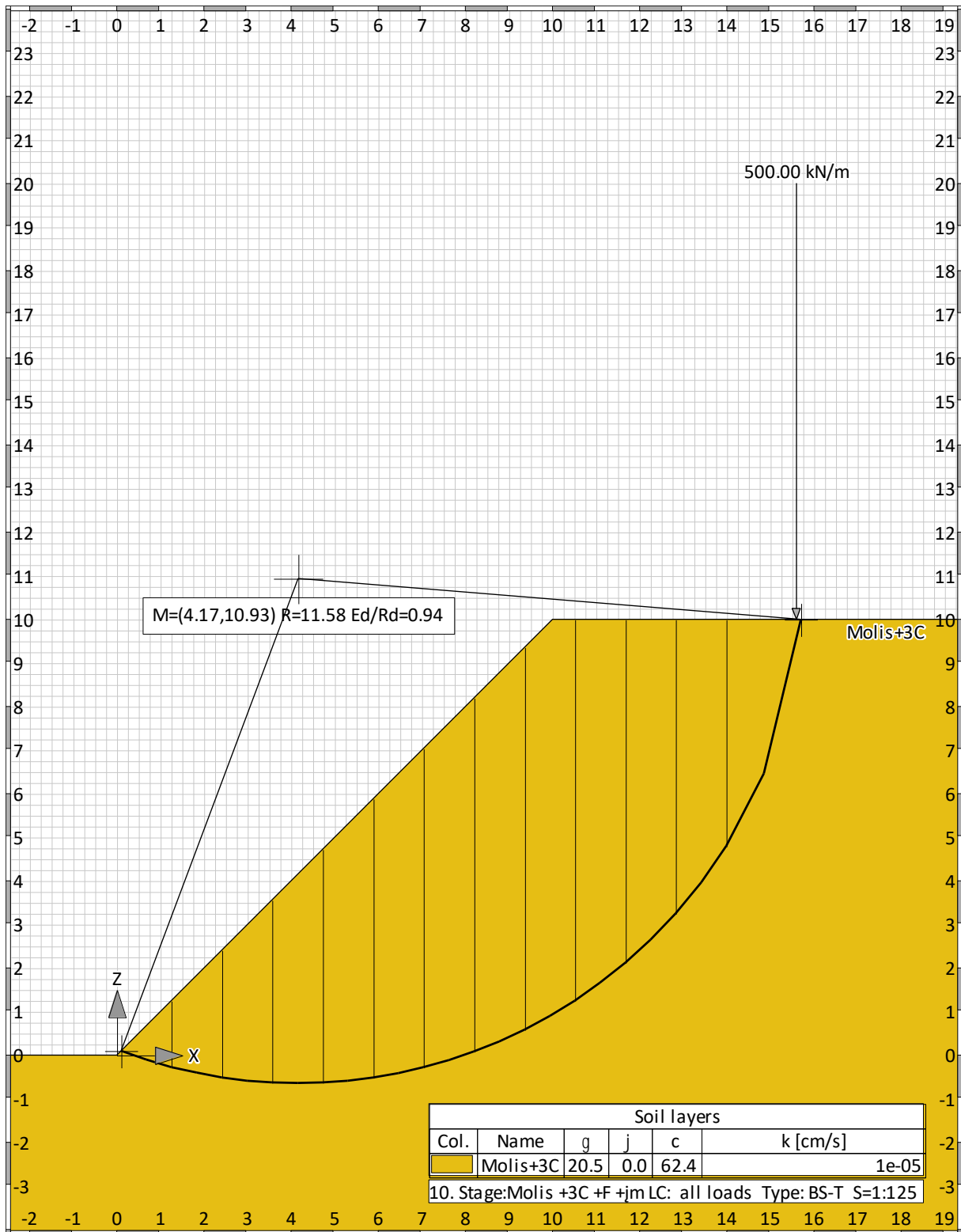
Variantas – „Molis + 3C + jm“:



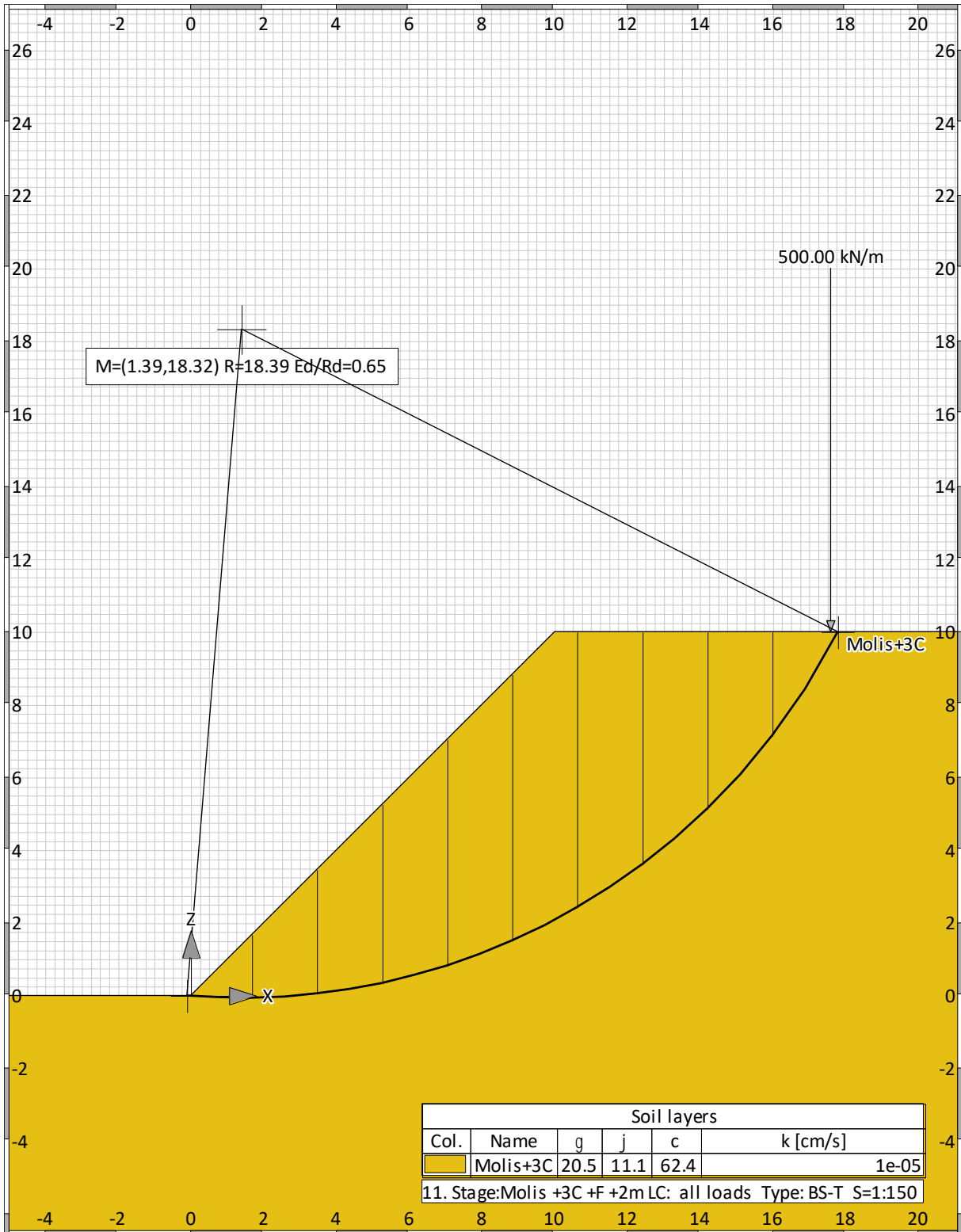
Variantas – „Molis + 3C + F“:



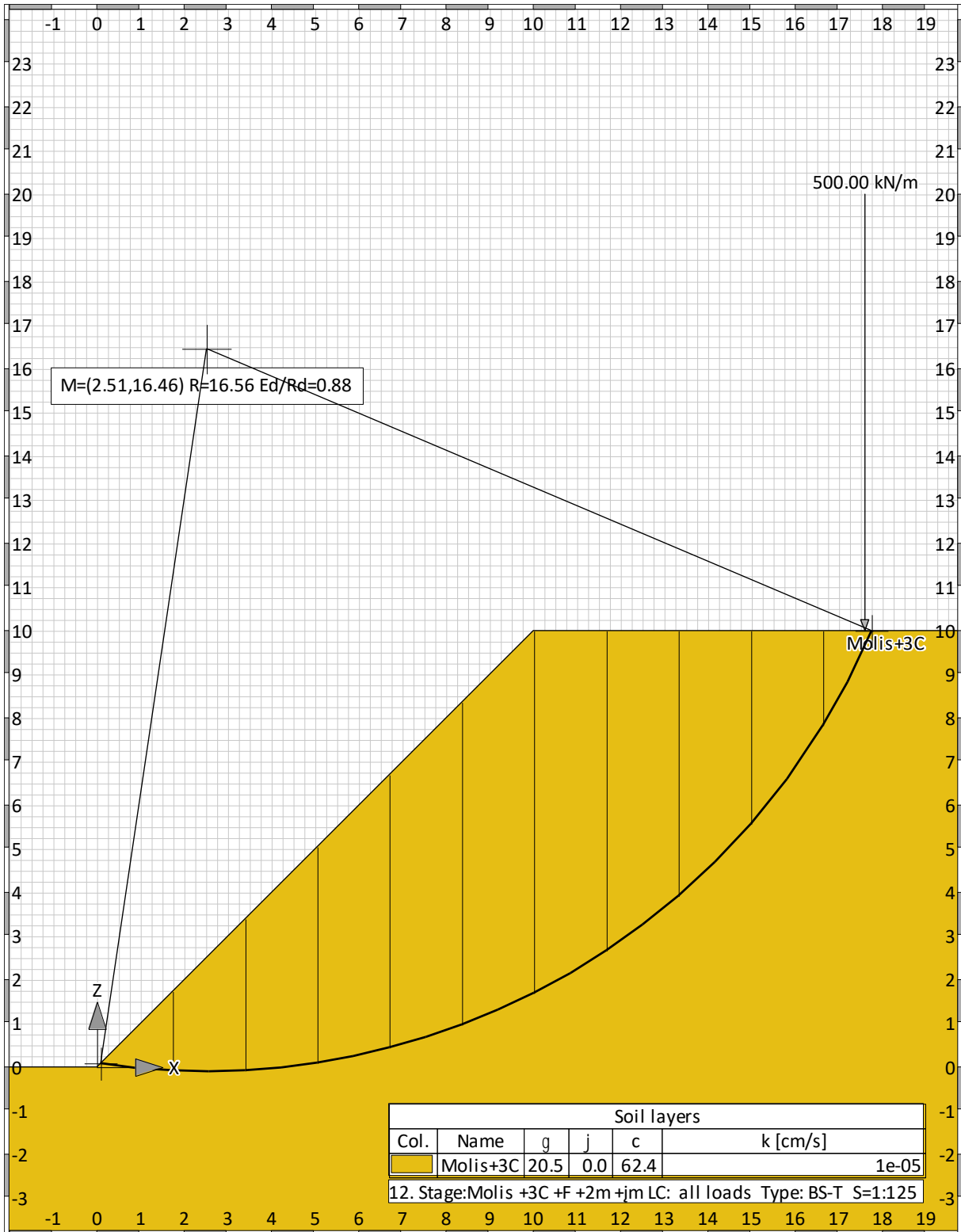
Variantas – „Molis + 3C + F + jm“:



Variantas – „Molis + 3C + F + 2m“:



Variantas – „Molis + 3C + F + 2m + jm“:



2 Priedas. Vertikalių poveikių skaičiavimo rezultatai (H=10 m; $\beta=45^\circ$)

Variantas – „Molis“:

Ruožų geometriniai parametrai:

Nr.	x [m]	Plotis b [m]	dxM [m]	Svoris [kN/m]	Apkrova z-Ri. [kN/m]	vandens- paviršius. [kN/m]	u·b [kN/m]	φ [°]	c [kN/m ²]	θ [°]
1	0.69	1.36	-1.72	22.0	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	-7.27
2	2.05	1.36	-0.36	63.2	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	-1.52
3	3.41	1.36	1.00	100.5	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	4.22
4	4.77	1.36	2.36	133.9	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	9.99
5	6.14	1.36	3.73	163.3	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	15.87
6	7.50	1.36	5.09	188.5	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	21.93
7	8.86	1.36	6.45	208.8	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	28.26
8	10.23	1.36	7.82	215.0	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	35.00
9	11.59	1.36	9.18	186.5	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	42.34
10	12.95	1.36	10.54	146.3	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	50.67
11	14.62	1.97	12.21	106.9	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	63.61

Gautos vertikalios apkrovos ruožuose:

Nr.	Svoris [kN/m]	$G \cdot \sin(\theta)$ [kN/m]	$(G - u \cdot b) \cdot \tan(\varphi) + c \cdot b$ [kN/m]	$\mu \cdot \sin(\theta) \cdot \tan(\varphi) + \cos(\theta)$ [-]	T [kN/m]
1	22.03	-2.79	69.07	0.980407	70.45
2	63.17	-1.67	75.42	0.997229	75.63
3	100.47	7.39	81.17	1.004015	80.85
4	133.91	23.24	86.33	1.000694	86.27
5	163.34	44.68	90.87	0.986872	92.08
6	188.46	70.39	94.75	0.961769	98.51
7	208.77	98.86	97.88	0.924072	105.92
8	214.97	123.29	98.84	0.871622	113.39
9	186.54	125.64	94.45	0.800741	117.95
10	146.27	113.14	88.24	0.704484	125.25
11	106.88	95.74	111.38	0.526410	211.59
		-----			-----
		697.91			1177.90

Variantas – „Molis + įm“:

Ruožų geometriniai parametrai:

Nr.	x [m]	Plotis b [m]	dxM [m]	Svoris [kN/m]	Apkrova z-Ri. [kN/m]	vandens- paviršius. [kN/m]	u·b [kN/m]	φ [°]	c [kN/m ²]	θ [°]
1	-10.34	1.91	-15.30	55.1	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	-45.00*
2	-8.42	1.91	-13.39	141.0	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	-44.41
3	-6.51	1.91	-11.48	205.6	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	-36.86
4	-4.60	1.91	-9.56	255.3	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	-29.99
5	-2.68	1.91	-7.65	293.3	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	-23.57
6	-0.77	1.91	-5.74	321.8	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	-17.45
7	1.14	1.91	-3.82	385.8	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	-11.53
8	3.06	1.91	-1.91	472.5	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	-5.73
9	4.97	1.91	0.00	551.6	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	0.01
10	6.88	1.91	1.92	623.1	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	5.75
11	8.79	1.91	3.83	686.9	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	11.55
12	10.71	1.91	5.74	714.2	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	17.47
13	12.62	1.91	7.66	686.7	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	23.59
14	14.53	1.91	9.57	648.7	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	30.01
15	16.45	1.91	11.48	598.9	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	36.88
16	18.36	1.91	13.39	534.3	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	44.44
17	20.27	1.91	15.31	448.3	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	53.15
18	22.66	2.87	17.70	423.5	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	67.68

Gautos vertikalios apkrovos ruožuose:

Nr.	Svoris [kN/m]	$G \cdot \sin(\theta)$ [kN/m]	$(G - u \cdot b) \cdot \tan(\varphi) + c \cdot b$ [kN/m]	$\mu \cdot \sin(\theta) \cdot \tan(\varphi) + \cos(\theta)$ [-]	T [kN/m]
1	55.09	-44.06	92.19	0.707107	130.38
2	140.98	-98.66	92.19	0.714304	129.07
3	205.59	-123.32	92.19	0.800124	115.22
4	255.27	-127.59	92.19	0.866121	106.44
5	293.27	-117.26	92.19	0.916587	100.58
6	321.78	-96.48	92.19	0.953991	96.64
7	385.83	-77.10	92.19	0.979830	94.09
8	472.54	-47.18	92.19	0.995004	92.66
9	551.58	0.09	92.19	1.000000	92.19
10	623.08	62.41	92.19	0.994971	92.66
11	686.92	137.50	92.19	0.979762	94.10
12	714.24	214.39	92.19	0.953887	96.65
13	686.69	274.79	92.19	0.916443	100.60
14	648.66	324.44	92.19	0.865930	106.47
15	598.93	359.46	92.19	0.799876	115.26
16	534.26	374.07	92.19	0.713981	129.12
17	448.28	358.70	92.19	0.599780	153.71
18	423.49	391.76	138.13	0.379778	363.71
		-----			-----
		1765.94			2209.55

Variantas – „Molis + F“:

Ruožų geometriniai parametrai:

Nr.	x [m]	Plotis b [m]	dxM [m]	Svoris [kN/m]	Apkrova z-Ri. [kN/m]	vandens- paviršius. [kN/m]	u·b [kN/m]	φ [°]	c [kN/m ²]	θ [°]
1	0.93	1.56	0.13	25.3	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	0.47
2	2.48	1.56	1.69	72.2	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	5.99
3	4.04	1.56	3.24	114.3	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	11.55
4	5.59	1.56	4.80	151.3	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	17.24
5	7.15	1.56	6.35	182.8	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	23.10
6	8.70	1.56	7.91	208.1	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	29.23
7	10.26	1.56	9.47	215.1	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	35.76
8	11.81	1.56	11.02	177.2	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	42.87
9	13.37	1.56	12.58	124.0	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	50.93
10	14.92	1.56	14.13	50.7	500.0	0.0	0.0	8.77	48.19	60.74

Gautos vertikalios apkrovos ruožuose:

Nr.	Svoris [kN/m]	G·sin(θ) [kN/m]	(G-u·b)·tan(φ) + c·b [kN/m]	μ·sin(θ)· tan(φ)+cos(θ) [-]	T [kN/m]
1	25.27	0.21	78.84	1.001097	78.76
2	72.21	7.53	86.09	1.008794	85.34
3	114.29	22.89	92.58	1.007097	91.93
4	151.27	44.83	98.28	0.995569	98.72
5	182.75	71.70	103.14	0.973420	105.96
6	208.06	101.61	107.04	0.939363	113.95
7	215.12	125.71	108.13	0.891324	121.32
8	177.17	120.54	102.28	0.825811	123.85
9	124.00	96.27	94.08	0.736319	127.77
10	550.69	480.43	159.90	0.607971	263.01
		-----			-----
		1071.71			1210.60

Variantas – „Molis + F + įm“:

Ruožų geometriniai parametrai:

Nr.	x [m]	Plotis b [m]	dxM [m]	Svoris [kN/m]	Apkrova z-Ri. [kN/m]	vandens- paviršius. [kN/m]	u·b [kN/m]	φ [°]	c [kN/m ²]	θ [°]
1	0.67	1.16	-3.49	18.5	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	-17.55
2	1.83	1.16	-2.33	53.3	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	-11.63
3	2.99	1.16	-1.18	85.1	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	-5.83
4	4.15	1.16	-0.02	114.1	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	-0.09
5	5.31	1.16	1.14	140.3	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	5.65
6	6.46	1.16	2.30	163.7	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	11.44
7	7.62	1.16	3.45	184.2	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	17.36
8	8.78	1.16	4.61	201.5	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	23.48
9	9.94	1.16	5.77	212.5	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	29.90
10	11.09	1.16	6.93	198.6	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	36.76
11	12.25	1.16	8.09	175.1	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	44.30
12	13.41	1.16	9.24	143.8	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	52.98
13	14.85	1.72	10.68	124.8	500.0	0.0	0.0	0.00	48.19	67.31

Gautos vertikalios apkrovos ruožuose:

Nr.	Svoris [kN/m]	$G \cdot \sin(\theta)$ [kN/m]	$(G - u \cdot b) \cdot \tan(\varphi) + c \cdot b$ [kN/m]	$\mu \cdot \sin(\theta) \cdot \tan(\varphi) + \cos(\theta)$ [-]	T [kN/m]
1	18.55	-5.59	55.79	0.953443	58.51
2	53.30	-10.74	55.79	0.979473	56.96
3	85.10	-8.64	55.79	0.994828	56.08
4	114.09	-0.18	55.79	0.999999	55.79
5	140.32	13.81	55.79	0.995144	56.06
6	163.75	32.49	55.79	0.980116	56.92
7	184.24	54.98	55.79	0.954433	58.45
8	201.54	80.30	55.79	0.917200	60.83
9	212.53	105.93	55.79	0.866932	64.35
10	198.65	118.88	55.79	0.801178	69.63
11	175.08	122.28	55.79	0.715682	77.95
12	143.76	114.78	55.79	0.602092	92.66
13	624.78	576.41	82.75	0.385794	214.48
		-----			-----
		1194.71			978.69

Variantas – „Molis + F + 2m“:

Ruožų geometriniai parametrai:

Nr.	x [m]	Plotis b [m]	dxM [m]	Svoris [kN/m]	Apkrova z-Ri. [kN/m]	vandens- paviršius. [kN/m]	u·b [kN/m]	φ [°]	c [kN/m ²]	θ [°]
1	0.78	1.79	-0.61	30.9	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	-1.89
2	2.57	1.79	1.18	95.6	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	3.69
3	4.36	1.79	2.97	153.9	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	9.31
4	6.15	1.79	4.76	205.6	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	15.01
5	7.94	1.79	6.55	250.1	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	20.88
6	9.73	1.79	8.34	282.7	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	26.98
7	11.52	1.79	10.13	258.3	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	33.44
8	13.31	1.79	11.92	208.8	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	40.42
9	15.10	1.79	13.71	144.5	0.0	0.0	0.0	8.77	48.19	48.22
10	16.89	1.79	15.50	57.7	500.0	0.0	0.0	8.77	48.19	57.46

Gautos vertikalios apkrovos ruožuose:

Nr.	Svoris [kN/m]	G·sin(θ) [kN/m]	(G-u·b)·tan(φ) + c·b [kN/m]	μ·sin(θ)· tan(φ)+cos(θ) [-]	T [kN/m]
1	30.89	-1.02	90.99	0.995168	91.43
2	95.59	6.15	100.97	1.006311	100.34
3	153.95	24.89	109.98	1.007900	109.11
4	205.61	53.26	117.95	0.999606	117.99
5	250.14	89.14	124.82	0.980763	127.26
6	282.75	128.28	129.85	0.950253	136.64
7	258.33	142.34	126.08	0.906267	139.12
8	208.83	135.39	118.44	0.845802	140.04
9	144.53	107.77	108.52	0.763452	142.15
10	557.65	470.09	172.26	0.647744	265.93
		-----			-----
		1156.30			1370.03

Variantas – „Molis + F + 2m + įm“:

Ruožų geometriniai parametrai:

Nr.	x [m]	Plotis b [m]	dxM [m]	Svoris [kN/m]	Apkrova z-Ri. [kN/m]	vandens- paviršius. [kN/m]	u·b [kN/m]	φ [°]	c [kN/m ²]	θ [°]
1	0.91	1.66	-1.60	31.7	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	-5.53
2	2.57	1.66	0.06	90.7	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	0.20
3	4.22	1.66	1.71	144.1	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	5.94
4	5.88	1.66	3.37	191.7	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	11.74
5	7.53	1.66	5.03	233.3	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	17.67
6	9.19	1.66	6.68	268.3	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	23.80
7	10.85	1.66	8.34	267.2	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	30.24
8	12.50	1.66	9.99	229.6	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	37.13
9	14.16	1.66	11.65	180.7	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	44.71
10	15.81	1.66	13.31	115.6	0.0	0.0	0.0	0.00	48.19	53.47
11	17.20	1.11	14.69	27.0	500.0	0.0	0.0	0.00	48.19	62.51

Gautos vertikalios apkrovos ruožuose:

Nr.	Svoris [kN/m]	G·sin(θ) [kN/m]	(G-u·b)·tan(φ) + c·b [kN/m]	μ·sin(θ)· tan(φ)+cos(θ) [-]	T [kN/m]
1	31.65	-3.05	79.80	0.995338	80.17
2	90.68	0.32	79.80	0.999994	79.80
3	144.06	14.92	79.80	0.994624	80.23
4	191.69	39.02	79.80	0.979063	81.51
5	233.29	70.82	79.80	0.952814	83.75
6	268.34	108.29	79.80	0.914955	87.22
7	267.18	134.54	79.80	0.863962	92.36
8	229.59	138.57	79.80	0.797320	100.08
9	180.70	127.13	79.80	0.710640	112.29
10	115.60	92.89	79.80	0.595229	134.06
11	526.98	467.50	53.58	0.461524	116.09
		-----			-----
		1190.96			1047.57

Variantas – „Molis + 3C“:

Ruožų geometriniai parametrai:

Nr.	x [m]	Plotis b [m]	dxM [m]	Svoris [kN/m]	Apkrova z-Ri. [kN/m]	vandens- paviršius. [kN/m]	u·b [kN/m]	φ [°]	c [kN/m ²]	θ [°]
1	0.69	1.36	-1.72	22.0	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	-7.27
2	2.05	1.36	-0.36	63.0	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	-1.52
3	3.41	1.36	1.00	100.3	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	4.22
4	4.77	1.36	2.36	133.6	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	9.99
5	6.14	1.36	3.73	163.0	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	15.87
6	7.50	1.36	5.09	188.1	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	21.93
7	8.86	1.36	6.45	208.4	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	28.26
8	10.23	1.36	7.82	214.6	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	35.00
9	11.59	1.36	9.18	186.2	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	42.34
10	12.95	1.36	10.54	146.0	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	50.67
11	14.62	1.97	12.21	106.7	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	63.61

Gautos vertikalios apkrovos ruožuose:

Nr.	Svoris [kN/m]	G·sin(θ) [kN/m]	(G-u·b)·tan(φ) + c·b [kN/m]	μ·sin(θ)· tan(φ)+cos(θ) [-]	T [kN/m]
1	21.99	-2.78	89.29	0.980606	91.06
2	63.04	-1.67	97.33	0.997271	97.60
3	100.27	7.37	104.62	1.003900	104.21
4	133.65	23.19	111.16	1.000421	111.11
5	163.02	44.59	116.91	0.986441	118.52
6	188.09	70.26	121.82	0.961181	126.74
7	208.36	98.66	125.79	0.923327	136.23
8	214.56	123.05	127.00	0.870719	145.86
9	186.17	125.39	121.44	0.799680	151.86
10	145.99	112.92	113.57	0.703266	161.49
11	106.68	95.56	143.68	0.525000	273.68
		-----			-----
		696.56			1518.36

Variantas – „Molis + 3C + įm“:

Ruožų geometriniai parametrai:

Nr.	x [m]	Plotis b [m]	dxM [m]	Svoris [kN/m]	Apkrova z-Ri. [kN/m]	vandens- paviršius. [kN/m]	u·b [kN/m]	φ [°]	c [kN/m ²]	θ [°]
1	-10.34	1.91	-15.30	55.0	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	-45.00*
2	-8.42	1.91	-13.39	140.7	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	-44.41
3	-6.51	1.91	-11.48	205.2	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	-36.86
4	-4.60	1.91	-9.56	254.8	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	-29.99
5	-2.68	1.91	-7.65	292.7	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	-23.57
6	-0.77	1.91	-5.74	321.2	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	-17.45
7	1.14	1.91	-3.82	385.1	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	-11.53
8	3.06	1.91	-1.91	471.6	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	-5.73
9	4.97	1.91	0.00	550.5	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	0.01
10	6.88	1.91	1.92	621.9	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	5.75
11	8.79	1.91	3.83	685.6	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	11.55
12	10.71	1.91	5.74	712.8	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	17.47
13	12.62	1.91	7.66	685.4	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	23.59
14	14.53	1.91	9.57	647.4	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	30.01
15	16.45	1.91	11.48	597.8	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	36.88
16	18.36	1.91	13.39	533.2	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	44.44
17	20.27	1.91	15.31	447.4	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	53.15
18	22.66	2.87	17.70	422.7	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	67.68

Gautos vertikalios apkrovos ruožuose:

Nr.	Svoris [kN/m]	$G \cdot \sin(\theta)$ [kN/m]	$(G - u \cdot b) \cdot \tan(\varphi) + c \cdot b$ [kN/m]	$\mu \cdot \sin(\theta) \cdot \tan(\varphi) + \cos(\theta)$ [-]	T [kN/m]
1	54.98	-43.98	119.30	0.707107	168.72
2	140.70	-98.47	119.30	0.714304	167.02
3	205.19	-123.08	119.30	0.800124	149.10
4	254.78	-127.35	119.30	0.866121	137.74
5	292.70	-117.03	119.30	0.916587	130.16
6	321.16	-96.29	119.30	0.953991	125.06
7	385.08	-76.95	119.30	0.979830	121.76
8	471.62	-47.08	119.30	0.995004	119.90
9	550.51	0.09	119.30	1.000000	119.30
10	621.87	62.29	119.30	0.994971	119.90
11	685.58	137.23	119.30	0.979762	121.77
12	712.85	213.97	119.30	0.953887	125.07
13	685.35	274.25	119.30	0.916443	130.18
14	647.40	323.80	119.30	0.865930	137.77
15	597.76	358.76	119.30	0.799876	149.15
16	533.22	373.34	119.30	0.713981	167.09
17	447.41	358.00	119.30	0.599780	198.91
18	422.66	391.00	178.74	0.379778	470.66
		-----			-----
		1762.51			2859.25

Variantas – „Molis + 3C + F“:

Ruožų geometriniai parametrai:

Nr.	x [m]	Plotis b [m]	dxM [m]	Svoris [kN/m]	Apkrova z-Ri. [kN/m]	vandens- paviršius. [kN/m]	u·b [kN/m]	φ [°]	c [kN/m ²]	θ [°]
1	0.93	1.56	0.13	25.2	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	0.47
2	2.48	1.56	1.69	72.1	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	5.99
3	4.04	1.56	3.24	114.1	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	11.55
4	5.59	1.56	4.80	151.0	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	17.24
5	7.15	1.56	6.35	182.4	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	23.10
6	8.70	1.56	7.91	207.7	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	29.23
7	10.26	1.56	9.47	214.7	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	35.76
8	11.81	1.56	11.02	176.8	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	42.87
9	13.37	1.56	12.58	123.8	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	50.93
10	14.92	1.56	14.13	50.6	500.0	0.0	0.0	11.08	62.36	60.74

Gautos vertikalios apkrovos ruožuose:

Nr.	Svoris [kN/m]	G·sin(θ) [kN/m]	(G-u·b)·tan(φ) + c·b [kN/m]	μ·sin(θ)· tan(φ)+cos(θ) [-]	T [kN/m]
1	25.22	0.21	101.92	1.001079	101.81
2	72.07	7.52	111.10	1.008568	110.15
3	114.07	22.85	119.32	1.006663	118.53
4	150.98	44.74	126.55	0.994926	127.20
5	182.40	71.56	132.70	0.972569	136.45
6	207.66	101.41	137.65	0.938304	146.70
7	214.71	125.46	139.03	0.890057	156.20
8	176.83	120.31	131.61	0.824336	159.66
9	123.76	96.08	121.22	0.734636	165.01
10	550.60	480.34	204.81	0.606080	337.92
		-----			-----
		1070.48			1559.63

Variantas – „Molis + 3C + F + įm“:

Ruožų geometriniai parametrai:

Nr.	x [m]	Plotis b [m]	dxM [m]	Svoris [kN/m]	Apkrova z-Ri. [kN/m]	vandens- paviršius. [kN/m]	u·b [kN/m]	φ [°]	c [kN/m ²]	θ [°]
1	0.67	1.16	-3.49	18.5	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	-17.55
2	1.83	1.16	-2.33	53.2	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	-11.63
3	2.99	1.16	-1.18	84.9	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	-5.83
4	4.15	1.16	-0.02	113.9	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	-0.09
5	5.31	1.16	1.14	140.1	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	5.65
6	6.46	1.16	2.30	163.4	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	11.44
7	7.62	1.16	3.45	183.9	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	17.36
8	8.78	1.16	4.61	201.2	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	23.48
9	9.94	1.16	5.77	212.1	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	29.90
10	11.09	1.16	6.93	198.3	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	36.76
11	12.25	1.16	8.09	174.7	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	44.30
12	13.41	1.16	9.24	143.5	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	52.98
13	14.85	1.72	10.68	124.5	500.0	0.0	0.0	0.00	62.36	67.31

Gautos vertikalios apkrovos ruožuose:

Nr.	Svoris [kN/m]	G·sin(θ) [kN/m]	(G-u·b)·tan(φ) + c·b [kN/m]	μ·sin(θ)· tan(φ)+cos(θ) [-]	T [kN/m]
1	18.51	-5.58	72.19	0.953443	75.72
2	53.19	-10.72	72.19	0.979473	73.71
3	84.93	-8.63	72.19	0.994828	72.57
4	113.87	-0.18	72.19	0.999999	72.19
5	140.05	13.78	72.19	0.995144	72.55
6	163.43	32.43	72.19	0.980116	73.66
7	183.88	54.87	72.19	0.954433	75.64
8	201.15	80.14	72.19	0.917200	78.71
9	212.11	105.72	72.19	0.866932	83.28
10	198.26	118.65	72.19	0.801178	90.11
11	174.74	122.04	72.19	0.715682	100.87
12	143.48	114.56	72.19	0.602092	119.91
13	624.54	576.19	107.08	0.385794	277.55
		-----			-----
		1193.28			1266.46

Variantas – „Molis + 3C + F + 2m“:

Ruožų geometriniai parametrai:

Nr.	x [m]	Plotis b [m]	dxM [m]	Svoris [kN/m]	Apkrova z-Ri. [kN/m]	vandens- paviršius. [kN/m]	u·b [kN/m]	φ [°]	c [kN/m ²]	θ [°]
1	0.78	1.79	-0.61	30.8	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	-1.89
2	2.57	1.79	1.18	95.4	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	3.69
3	4.36	1.79	2.97	153.6	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	9.31
4	6.15	1.79	4.76	205.2	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	15.01
5	7.94	1.79	6.55	249.7	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	20.88
6	9.73	1.79	8.34	282.2	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	26.98
7	11.52	1.79	10.13	257.8	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	33.44
8	13.31	1.79	11.92	208.4	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	40.42
9	15.10	1.79	13.71	144.2	0.0	0.0	0.0	11.08	62.36	48.22
10	16.89	1.79	15.50	57.5	500.0	0.0	0.0	11.08	62.36	57.46

Gautos vertikalios apkrovos ruožuose:

Nr.	Svoris [kN/m]	$G \cdot \sin(\theta)$ [kN/m]	$(G - u \cdot b) \cdot \tan(\varphi) + c \cdot b$ [kN/m]	$\mu \cdot \sin(\theta) \cdot \tan(\varphi) + \cos(\theta)$ [-]	T [kN/m]
1	30.83	-1.02	117.62	0.995235	118.18
2	95.40	6.14	130.26	1.006180	129.46
3	153.65	24.85	141.67	1.007570	140.61
4	205.21	53.16	151.77	0.999077	151.91
5	249.66	88.97	160.47	0.980036	163.74
6	282.20	128.03	166.84	0.949327	175.75
7	257.82	142.06	162.07	0.905142	179.06
8	208.43	135.13	152.40	0.844478	180.46
9	144.25	107.56	139.83	0.761930	183.52
10	557.54	470.00	220.76	0.646023	341.73
		-----			-----
		1154.87			1764.42

Variantas – „Molis + 3C + F + 2m + įm“:

Ruožų geometriniai parametrai:

Nr.	x [m]	Plotis b [m]	dxM [m]	Svoris [kN/m]	Apkrova z-Ri. [kN/m]	vandens- paviršius. [kN/m]	u·b [kN/m]	φ [°]	c [kN/m ²]	θ [°]
1	0.91	1.66	-1.60	31.6	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	-5.53
2	2.57	1.66	0.06	90.5	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	0.20
3	4.22	1.66	1.71	143.8	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	5.94
4	5.88	1.66	3.37	191.3	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	11.74
5	7.53	1.66	5.03	232.8	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	17.67
6	9.19	1.66	6.68	267.8	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	23.80
7	10.85	1.66	8.34	266.7	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	30.24
8	12.50	1.66	9.99	229.1	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	37.13
9	14.16	1.66	11.65	180.4	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	44.71
10	15.81	1.66	13.31	115.4	0.0	0.0	0.0	0.00	62.36	53.47
11	17.20	1.11	14.69	26.9	500.0	0.0	0.0	0.00	62.36	62.51

Gautos vertikalios apkrovos ruožuose:

Nr.	Svoris [kN/m]	G·sin(θ) [kN/m]	(G-u·b)·tan(φ) + c·b [kN/m]	μ·sin(θ)· tan(φ)+cos(θ) [-]	T [kN/m]
1	31.59	-3.05	103.26	0.995338	103.75
2	90.51	0.32	103.26	0.999994	103.26
3	143.78	14.89	103.26	0.994624	103.82
4	191.32	38.94	103.26	0.979063	105.47
5	232.83	70.68	103.26	0.952814	108.38
6	267.81	108.08	103.26	0.914955	112.86
7	266.66	134.28	103.26	0.863962	119.52
8	229.15	138.30	103.26	0.797320	129.51
9	180.35	126.89	103.26	0.710640	145.31
10	115.38	92.71	103.26	0.595229	173.49
11	526.93	467.46	69.33	0.461524	150.23
		-----			-----
		1189.50			1355.61