



Vilniaus Universitetas  
Gamtos mokslų fakultetas

Hidrogeologijos ir inžinerinės geologijos katedra

Marius Šalaviejus

## **Vertikalaus geostatinio įtempio tyrimai smėlyje**

Baigiamasis magistro darbas

Darbo vadovas:  
Dr. G. Žaržojus

Vilnius, 2016

## Turinys

Įvadas.....	2
1. Literatūros apžvalga .....	3
1.1. Įtempis ir jo tipai gruntuose.....	3
1.2. Tiesioginis geostatinio įtempio matavimas .....	4
1.3. K. von Terzaghi pasiūlyta efektyviųjų įtempių teorija .....	6
1.4. Vertikalaus efektyviojo geostatinio įtempio skaičiavimai aeracijos zonoje.....	10
2. Inžinerinės geologinės sąlygos.....	13
2.1. Geografinė padėtis.....	13
2.2. Geologinės ir geomorfologinės sąlygos .....	14
2.3. Inžinerinės geologinės ir hidrogeologinės sąlygos.....	16
3. Bandymų metodika .....	16
3.1. Bandymų įranga.....	16
3.2. Efektyviųjų įtempių skaičiavimo metodika.....	20
3.3. Bandymo eiga .....	23
3.4. Laboratoriniai tyrimai.....	24
4. Tyrimų rezultatai .....	26
4.1. Grunto savybės .....	26
4.2. Suminio ir efektyviojo vertikalaus geostatinio įtempio skaičiavimas.....	30
4.3. Suminio vertikalaus geostatinio įtempio tiesioginio matavimo rezultatai.....	36
4.4. Efektyviojo vertikalaus įtempio skaičiavimo rezultatai .....	37
4.5. Gautų matavimo ir skaičiavimo rezultatų palyginimas .....	39
5. Duomenų apibendrinimas .....	47
Išvados .....	48
Literatūra .....	49
Summary.....	50

## Įvadas

Smėlis žmogaus inžinerinėje ūkinėje veikloje užima svarbią vietą. Būdami natūralios būklės jie gali sudaryti įvairių statinių pagrindą, o kaip piltinis gruntas naudojami įvairioms sampyloms, dangoms ir kaip sudėtinė dirbtinių statybinių medžiagų dalis.

Smėlis paplitęs visose pasaulio šalyse. Vien Lietuvoje jis dengia per 30% visos šalies teritorijos, todėl naudojant šį gruntą kaip inžinerinių statinių pagrindą, būtina tinkamai įvertinti jo fizinių ir įtempių būvį. Svarbu projektuojant naujus inžinerinius statinius yra įvertinti grunto masyvo vertikalųjį geostatinį įtempį. Vertikalus geostatinis įtempis gali būti apskaičiuojamas nustatčius grunto fizinio būvio parametrus, tokius kaip tankį ir drėgnį, o taip pat tiesiogiai išmatuotas prietaisais. Sprendžiant praktinius uždavinius, geostatinis įtempis paprastai yra apskaičiuojamas naudojant K. Terzaghi pasiūlytus efektyviųjų įtempių teorijos sprendinius. Jo matavimai atliekami itin retai, nes matavimų įranga yra sudėtinga ir preciziška, o tai dažnai sunku panaudoti praktikoje. Šis darbas yra skirtas išmatuoto geostatinio įtempio verčių palyginimui su apskaičiuotomis jo vertėmis. Be to, šiame darbe analizuojamos efektyviųjų įtempių vertės, kurios apskaičiuojamas iš tiesioginio matavimo rezultatų ir smėlio fizinių būvį nusakančių charakteristikų.

Darbo tikslas – atlikti apskaičiuoto ir išmatuoto vertikalaus geostatinio įtempio smėliniame grunte lyginamąją analizę.

Tiksliui pasiekti išskelti šie uždaviniai:

- išanalizuoti pasaulinę patirtį nustatant geostatinius įtempius grunte;
- sudaryti tinkamą bandymų metodiką;
- remiantis sudaryta metodika atlikti geostatinio įtempio tiesioginius matavimus kasiniuose. Iš iškastų kasinių sienelių paimti grunto bandinius jo klasifikavimui ir fizinio būvio aprašymui.
- laboratorijoje nustatčius smėlio tankį ir drėgnį apskaičiuoti teorinius vertikalaus geostatinio įtempio dydžius.
- pateikti tiesioginio bandymo metu gautų ir apskaičiuotų verčių analizę.

Už pagalbą rengiant šį magistro darbą, dėkoju savo darbo vadovui dr. G. Žaržojui. Taip pat, už suteiktą pagalbą konstruojant tiesioginio matavimo įrangą inžinieriui geologui A. Dankin.

# 1. Literatūros apžvalga

## 1.1. Įtempis ir jo tipai gruntuose

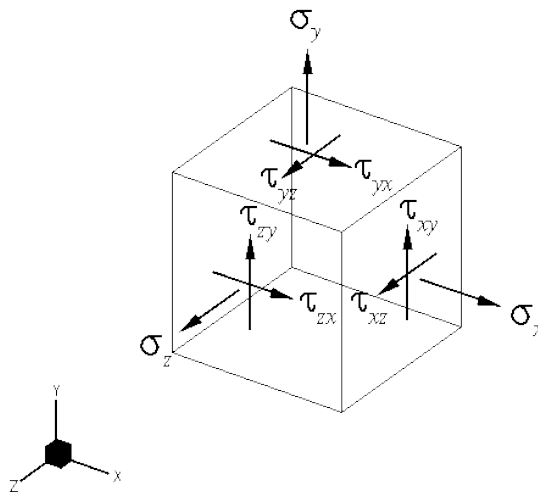
Įtempis yra vidinių jėgų intensyvumo matas, aprašantis tempiančią arba spaudžiančią jėgą, tenkančią ploto vienetui. Tai yra vektorius, kurio kryptis tokia pat, kaip ties tuo skerspjūvio tašku veikiančių vidinių jėgų. Taip pat ši sąvoka naudojama apibūdinti vidinę kūno jėgą, veikiančią įsivaizduojamoje plokštumoje, bei atsirandančią kūną gniuždant arba tempiant. Įtempis yra išreiškiamas 1.1 formule.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

čia  $\sigma$  – įtempis (Pa),  $F$  – jėga (N),  $A$  – jėgos veikiamas plotas ( $m^2$ )

Geostatiniai įtempiai – tai gamtiniai įtempiai, kurie atsiranda grunte, dėl jame veikiančių vidinių jėgų. Jėgos grunte atsiranda dėl pačio grunto sunkio, požeminio vandens sunkio, papildomos priekrovos grunte ar paviršiuje bei filtracinių jėgų.

Įtempiai veikiantys mažą grunto elementą pavaizduoti 1.1 paveiksle. Normalinis įtempis kūno medžiagos mažiausias daleles verčia priartėti vienas prie kitų arba atitolti. Tangentinis įtempis veikia medžiagos daleles taip, kad jos pasislenka viena kitos atžvilgiu.



1.1 pav. Įtempiai grunte

Normalinis įtempis žymimas graikiška raide  $\sigma$  (sigma), tai vidinių jėgų intensyvumas, veikiantis normalės kryptimi.

$$\sigma = \frac{\Delta F_n}{\Delta A}, \text{ kur } \Delta A \rightarrow 0, \quad (1.2)$$

čia,  $\sigma$  – normalinis įtempis (Pa),  $\Delta F_n$  – jėga veikianti normaline kryptimi (N),  $\Delta A$  – jėgos veikiamas plotas ( $\text{m}^2$ )

Tangentinis įtempis ir žymimas graikiška raide  $\tau$  (tau), tai vidinių jėgų intensyvumas, veikiantis plokštumoje (Vable, 2002)

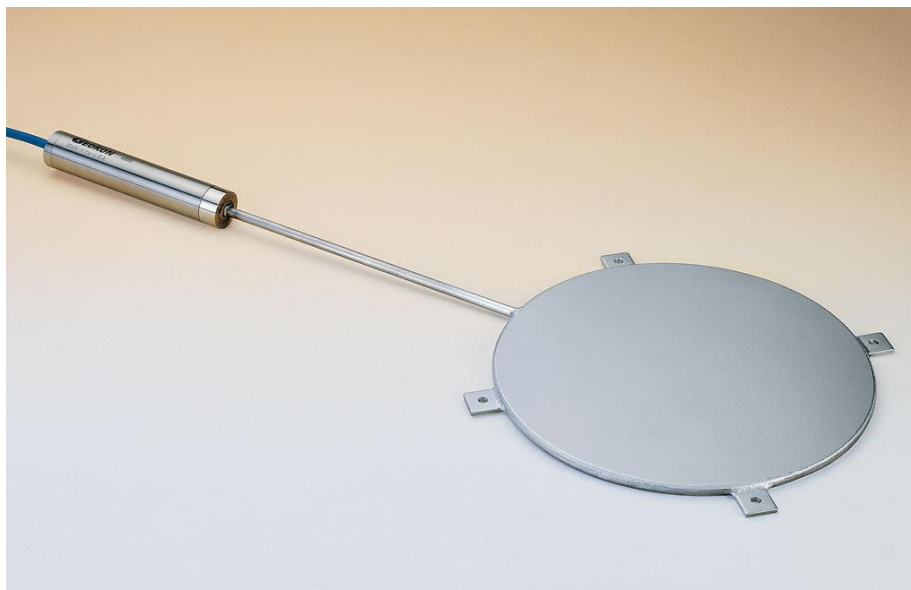
$$\tau = \frac{\Delta F_t}{\Delta A}, \text{ kur } \Delta A \rightarrow 0, \quad (1.3)$$

čia,  $\tau$  – tangentinis įtempis (Pa),  $\Delta F_t$  – jėga veikianti tangentinė kryptimi (N),  $\Delta A$  – jėgos veikiamas plotas ( $\text{m}^2$ )

## 1.2. Tiesioginis geostatinio įtempio matavimas

Tiesiogiai išmatuoti geostatinį įtempį naudojami specializuoti prietaisai. Šiuose prietaisuose nuo grunto masyvo sukkelto spaudimo deformuojasi esančios slėgio kapsulės arba kameros, kurios būna užpildytos skysčiu arba dujomis. Vykstant kapsulės deformacijai atsiranda esančio viduje skysčio ar dujų slėgis. Atsiradusiu slėgiu yra matuojamas grunto masyvo suminis geostatinis įtempis. Populiariausia matavimo įranga yra slėgio kapsulė (1.2 pav.) ir išspraudžiama slėgio kapsulė (1.3 pav.).

**Slėgio kapsulė** (Margason, Irwin 1964)



1.2 pav. Standartinė „Geocon“ firmos slėgio kapsulė, modelis 4800

Šių slėgio kapsulių pagalba matuojamas suminis geostatinis įtempis ( $\sigma$ ), kurį sudaro efektyvusis geostatinis įtempis ( $\sigma'$ ) ir porinis slėgis ( $u$ ). Remiantis Karl von Terzaghi 1923 m. efektyviųjų įtempių teorija:

$$\sigma' = \sigma - u ; \quad (1.4)$$

čia,  $\sigma'$  – efektyvusis geostatinis įtempis (Pa),  $\sigma$  – suminis geostatinis įtempis (Pa),  $u$  – porinis slėgis (Pa)

Taigi naudojant slėgio kapsulę, norint išmatuoti efektyvųjį geostatini įtempį, reikia tuo pačiu atlikti ir porinio slėgio matavimą.

Slėgio kapsulės naudojamos daugelyje sričių, kuriuose reikia išmatuoti grunto parametrus ar jo poveikį į inžinerines konstrukcijas. Dažniausiai naudojama vertinant papildomų įtempių grunte atsiradimą dėl sampylų ir sankasų įrengimo, grunto poveikį į statinių pamatus sienas ar atramines sienas, kelių pagrindo ar dangų deformacijas bei vandens telkinių ar baseinų įtaką gruntams.

**Įspraudžiama slėgio kapsulė** (ang. push-in earth pressure-cell).

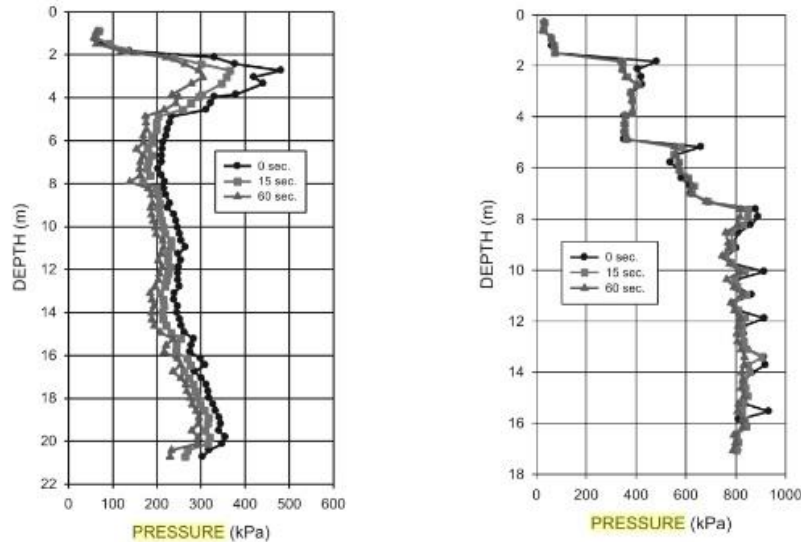


1.3 pav. Įspraudžiama „Geocon“ firmos slėgio kapsulė, modelis 4830)

Įspraudžiama slėgio kapsulė yra sukonstruota taip, kad būtų galima įsprausti į gruntą. Kapsulei pasiekus reikiama tašką grunte galima išmatuoti vertikalųjį geostatini įtempį ( $\sigma_v$ ), jei

kapsulė spaudžiama horizontaliai, šoninį geostatinį įtempį ( $\sigma$ ), jei kapsulė spaudžiama vertikaliai ir porinį slėgį ( $u$ ).

Įspraudžiam kapsulė išmatuoja šoninio geostatinio įtempio dydžius skirtinguose gyliuose (1.4 pav.).



1.4 pav. Šoninio geostatinio įtempio nuo gylio grafikas (Lutenegger, 2013)

Svarbiausias nustatomas parametras yra  $K_d$  – horizontalaus įtempio rodiklis, kuris apskaičiuojamas 1.5 formule.

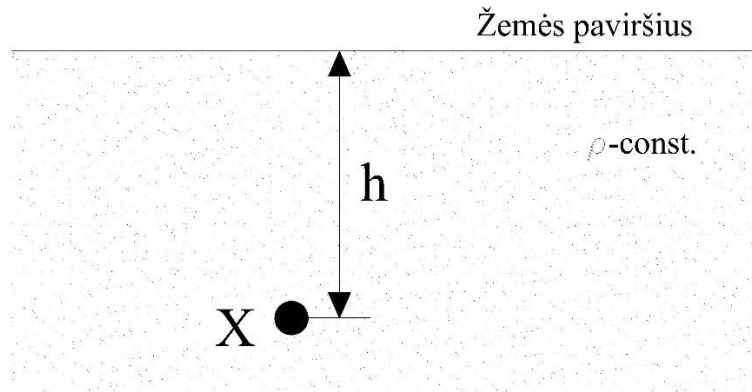
$$K_d = \frac{(\sigma - u)}{\sigma_v'} ; \quad (1.5)$$

čia  $K_d$  – horizontalaus įtempio rodiklis,  $\sigma$  – suminis geostatinis įtempis (Pa),  $u$  – porinis slėgis (Pa),  $\sigma_v'$  - efektyvusis geostatinis įtempis (Pa).

### 1.3. K. von Terzaghi pasiūlyta efektyviųjų įtempių teorija

K. von Terzaghi 1925 metais pasiūlė efektyviųjų įtempiu teoriją, kuri ir dabar yra naudojama įvertinti gruntuose esančius įtempius.

Kai aukščiau esantis gruntas homogeniškas, litologiškai nekinta ir nėra prisotintas vandens, tankis išlieka pastovus per visą jo storį (1.5 pav.).



1.5 pav. Homogeniškas gruntas.

Tuomet suminis vertikalus geostatinis įtempis taške X apskaičiuojamas pagal 1.6 formulę.

$$\sigma = \gamma \cdot h, \quad (1.6)$$

čia,  $\sigma$  – suminis vertikalus geostatinis įtempis taške X (kPa),  $\gamma$  – grunto slūgsančio virš taško X savitasis sunkis ( $\text{kN/m}^3$ ),  $h$  – gylis nuo žemės paviršiaus iki taško X (m)

Grunto savitasis sunkis apskaičiuojamas pagal 1.7 formulę.

$$\gamma = \rho \cdot g, \quad (1.7)$$

čia,  $\gamma$  – grunto savitasis sunkis ( $\text{kN/m}^3$ ),  $\rho$  – grunto tankis ( $\text{Mg/m}^3$ ),  $g$  – laisvo kritimo pagreitis, lygus  $9,81 \text{ m/s}^2$

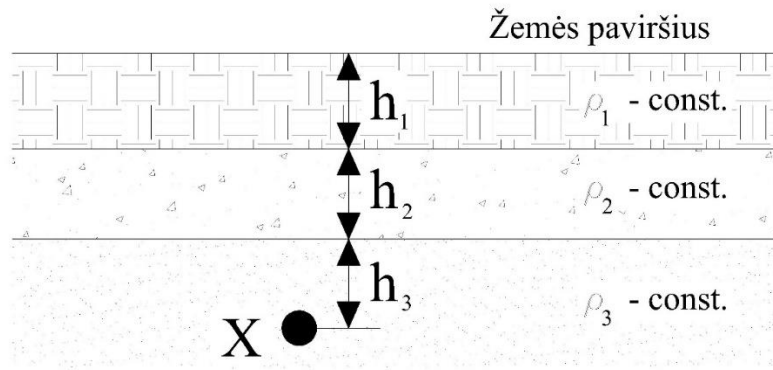
Šiuo atveju skaičiuojant efektyvųjų vertikalų geostatinį įtempį daroma prielaida, kad gruntas yra visiškai sausas. Grunto soties vandeniui laipsnis ( $S_r$ ) prilyginamas nuliui. Visiškai sausame grunte ( $S_r=0$ ) nėra porinio slėgio  $u = 0$ , todėl efektyvusis vertikalus įtempis yra lygus suminiam vertikaliam geostatiniam įtempiui.

$$\sigma' = \sigma, \quad (1.8)$$

čia,  $\sigma$  – suminis vertikalus geostatinis įtempis taške X (kPa),  $\sigma'$  – efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis taške X (kPa)

Kai aukščiau esantis gruntas yra sudarytas iš skirtingų sluoksnių, tačiau kiekvienas sluoksnis yra homogeniškas, kurio tankis yra pastovus (1.6 pav.)





1.6 pav. Daugiasluoksnė grunto stromė

Esant daugiasluoksnei stromei, su nekintančiais kiekvieno sluoksnio tankiais, suminis geostatinis įtempis taške X apskaičiuojamas pagal 1.9 formulę.

$$\sigma = \sum_I^n \gamma_i \cdot h_i, \quad (1.9)$$

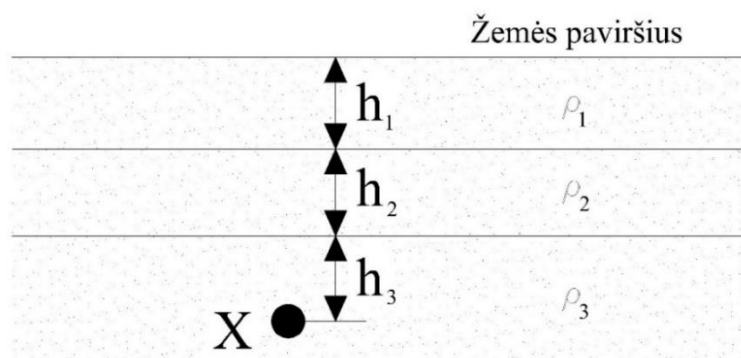
čia,  $\sigma$  – suminis vertikalus geostatinis įtempis taške X (kPa),  $\gamma$  – grunto savitasis sunkis (kN/m<sup>3</sup>),

$h$  – sluoksnio storis (m)

Skaičiuojant daugiasluoksnio grunto sukeliama suminį vertikalų geostatinį įtempį taške yra skaičiuojamas kiekvieno atskiro sluoksnio geostatinis įtempis. Gautos įtempių reikšmės sumuojamos.

Šiuo atveju efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis bus lygus suminiam vertikaliam geostatiniam įtempiui (1.8), kadangi grunto soties vandeniui laipsnis priimamas nulis ( $S_r = 0$ ) ir nėra porinio slėgio ( $u=0$ ).

Esant nehomogeniškam gruntui, litologiškai gruntas yra nekaitus, tačiau su gyliu kinta jo tankis (1.7 pav.)



1.7 pav. nehomogeniškas gruntas

Esant nehomogeniškam gruntui, įtempis taške X skaičiuojamas pagal 1.10 formulę.

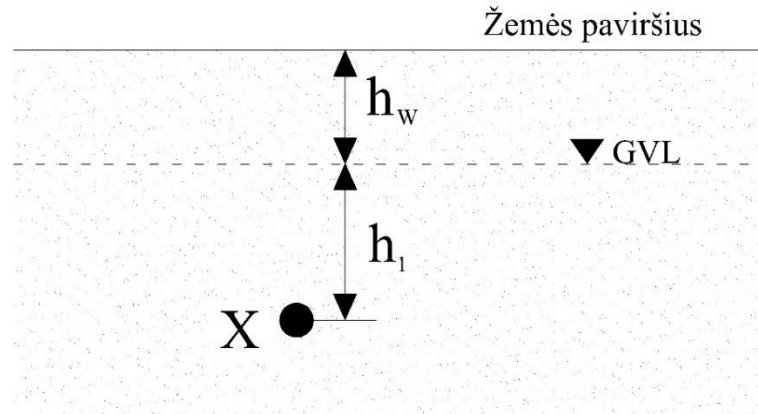
$$\sigma = \int_0^h \gamma dz ; \quad (1.10)$$

čia,  $\sigma$  – suminis vertikalus geostatinis įtempis taške X (kPa),  $\gamma$  – grunto savitasis sunkis (kN/m<sup>3</sup>),  
 $h$  – sluoksnio storis (m)

Skaičiuojant suminį vertikalų geostatinį įtempį taške X, kai virš slūgso nehomogeniškas gruntas yra sumuojama kiekvieno grunto sluoksnio savitojo sunkio, jo storio sandauga nuo esamo žemės paviršiaus iki taško X. Šis metodas vadinamas sluoksniu sumavimo metodu.

Šiuo atveju efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis bus lygus suminiam vertikaliam geostatiniam įtempiumi (1.8), kadangi grunto soties vandeniui laipsnis priimamas nulis ( $S_r = 0$ ) ir nėra porinio slėgio ( $u = 0$ ).

Kai gruntą sudaro mažai drėgno grunto sluoksnis ir po juo yra vandeningas gruntas (1.8 pav.).



1.8 pav. Grunte esantis vandens lygis

Esant dviem skirtingiems gruntams - mažai drėgnam ir prisotintam vandeniui - tuomet suminis vertikalus geostatinis įtempis taške bus apskaičiuojamas pagal 1.11 formulę.

$$\sigma = (\gamma \cdot h_w) + (\gamma_{sat} \cdot h_1) , \quad (1.11)$$

čia,  $\gamma$  – mažai drėgno grunto esančio virš vandens lygio savitasis sunkis (kN/m<sup>3</sup>),  $h_w$  – atstumas nuo žemės paviršiaus iki vandens lygio (m),  $\gamma_{sat}$  – vandeningo grunto savitasis sunkis (kN/m<sup>3</sup>),  $h_1$  – prisotinto grunto virš taško X aukštis (m)

Kadangi dalis grunto yra prisotinta vandeniu ( $S_r = 1$ ), tuomet šioje dalyje atsiranda porinio slėgio veikimas kuris apskaičiuojamas pagal 1.12 formulę.

$$u = \gamma_w \cdot h_l, \quad (1.12)$$

čia,  $u$  – porinis slėgis (kPa),  $\gamma_w$  – vandens savitasis sunkis ( $\text{kN/m}^3$ ),  $h_l$  – vandeningo grunto aukštis virš nagrinėjamo taško (m)

Dėl grunte esančio vandens ir porinio slėgio ( $u$ ) efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis tampa nelygus suminiam vertikaliam efektyviajam įtempiui. Gruntui esant vandenyje atsiranda plūdrumo jėgos. Dėl šių jėgų efektyvusis įtempis mažėja ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\sigma' = \sigma - u, \quad (1.13)$$

čia,  $\sigma'$  – efektyvusis geostatinis įtempis (Pa),  $\sigma$  – suminis geostatinis įtempis (Pa),  $u$  – porinis slėgis (Pa)

Nagrinėjamu atveju (1.8 pav.) efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis grunto daliai iki vandens lygio bus lygus suminiam vertikaliam geostatiniam įtempiui, o žemiau vandens lygio apskaičiuojamas pagal 1.13 formulę. Bendras efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis taške X apskaičiuojamas pagal 1.14 formulę.

$$\sigma' = \sigma - u = (\gamma \cdot h_w + \gamma_{\text{sat}} \cdot h_l) - (\gamma_w \cdot h_l), \quad (1.14)$$

čia,  $\gamma$  – mažai drėgno grunto esančio virš vandens lygio savitasis sunkis ( $\text{kN/m}^3$ ),  $h_w$  – atstumas nuo žemės paviršiaus iki vandens lygio (m),  $\gamma_{\text{sat}}$  – vandeningo grunto savitasis sunkis ( $\text{kN/m}^3$ ),  $h_l$  – prisotinto grunto virš taško X aukštis (m),  $\gamma_w$  – vandens savitasis sunkis ( $\text{kN/m}^3$ )

#### 1.4. Vertikalus efektyviojo geostatinio įtempio skaičiavimai aeracijos zonoje

Pagal Karlo Terzaghi efektyviųjų įtempių teoriją (1923 m.) efektyvusis geostatinis įtempis susideda iš dviejų komponentų - suminio geostatinio įtempio bei porinio slėgio.

Tačiau ši teorija galioja tik pilnai išotintiems ( $S_r = 1$ ) arba visiškai sausiems gruntams ( $S_r = 0$ ). Nepilnai išotintų gruntų ir aeracijos zonoje esančių gruntų ( $0 < S_r < 1$ ) elgesys yra labiau

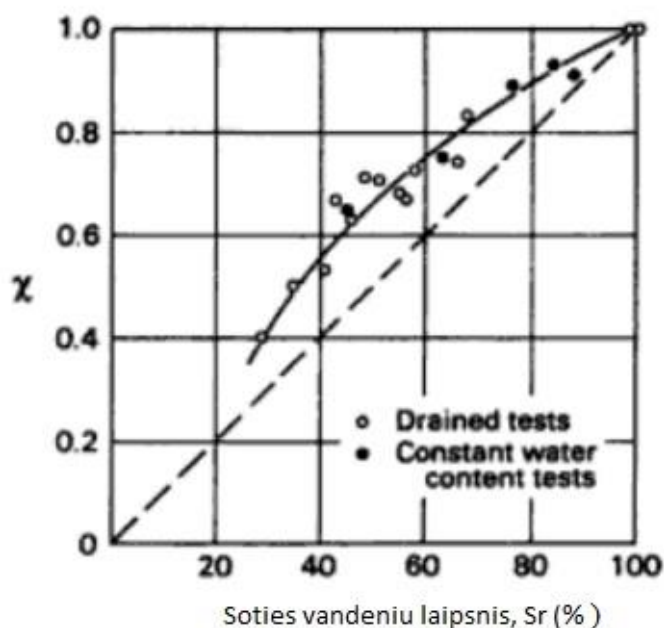
sudėtingesnis nei išotintų. Aeracijos zonoje esantys gruntai yra nagrinėjami kaip trijų komponentų sistemos, kurias sudaro grunto dalelės, poras iš dalies užpildantis vanduo ir esantis oras.

Efektyvusis geostatinis įtempis aeracijos zonoje apskaičiuojamas pagal 1.15 formulę (Bishop, 1960).

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w), \quad (1.15)$$

čia,  $\sigma'$  – efektyvusis geostatinis įtempis (kPa),  $\sigma$  – suminis geostatinis įtempis (kPa),  $u_w$  – porinis vandens slėgis (kPa),  $u_a$  – porinis oro slėgis (kPa),  $\chi$  – koeficientas priklausantis nuo grunto prisotinimo laipsnio ( $S_r$ )

Koeficientas  $\chi$  lygus 1 kai gruntas prisotintas vandeniu  $S_r = 1$ , lygus 0, kai  $S_r = 0$ , tačiau intervale nuo 0 iki 1 kinta ne tiesine priklausomybe. Priklausomybė tarp koeficiento  $\chi$  ir soties laipsnio  $S_r$  nustatyta eksperimentiškai ir pavaizduota 1.9 pav.



1.9 pav. Bishop ir Donald pateikta priklausomybė tarp koeficiento  $\chi$  ir soties vandeniui laipsnio  $S_r$  (Bishop, 1961)

Supaprastinta efektyviojo geostatinio įtempio formulė 1.16 (Aitchison, 1961).

$$\sigma' = \sigma + \psi p'', \quad (1.16)$$

čia,  $\psi$  – parametras kuris kinta nuo 0 iki 1,  $p''$  – porinio vandens slėgio trūkumas (kPa)

Jennings (1961) pasiūlė šiek tiek kitokią (1.17) formulę:

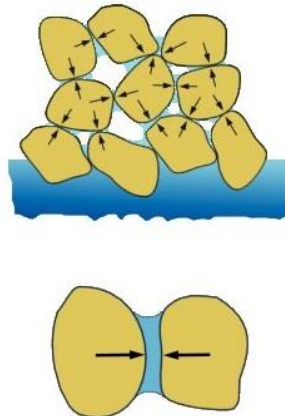
$$\sigma' = \sigma + \beta p'', \quad (1.17)$$

čia,  $\beta$  – parametras nustatomas eksperimentiškai,  $p''$  – porinio vandens slėgio modulis (kPa)

Visos trys efektyviojo geostatinio įtempio formulės (1.15) (1.16) (1.17) yra ekvivalenčios ir  $\chi = \psi = \beta$ , todėl koeficientus  $\psi$  ir  $\beta$  galima panaudoti iš Bishop'o ir Donald'o pateiktos priklausomybės tarp  $\chi$  ir  $S_r$  (1.9 pav.) (Fredlund, Rahardjo, 1993).

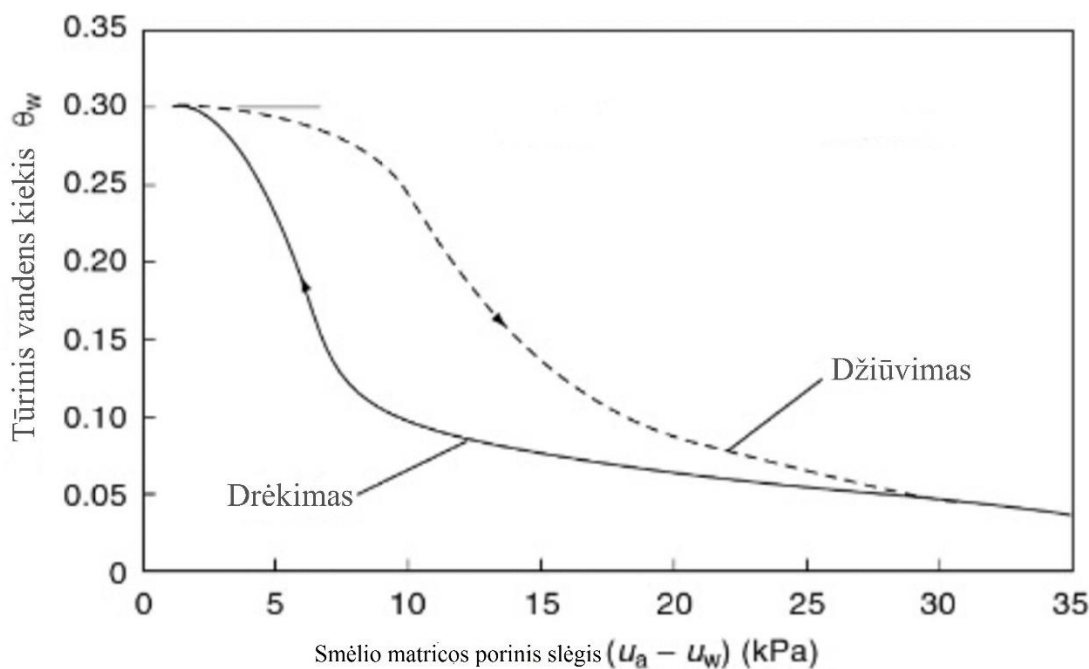
Neprisotintuose vandens gruntuose arba aeracijos zonoje esančiuose gruntuose porinio vandens slėgio trūkumas arba porinio vandens slėgio modulis  $p''$  yra lygus porinio oro ir porinio vandens slėgių skirtumui ( $u_a - u_w$ ). Šį skirtumą 1963 metais Bisoph'as ir Blight'as įvardino kaip grunto matricos įsiurbimo slėgį (ang. matric suction). Šis dydis aeracijos zonoje esančiuose gruntuose įgauna neigiamą reikšmę, nes  $u_a < u_w$ .

Neigiama grunto matricos įsiurbimo slėgio reikšmė rodo, kad aeracijos zonoje esančiuose smėlio gruntuose veikia dalelių traukimo efektas dėl esančio kapiliarinio vandens tempimo (1.10 pav.).



1.10 pav. Grunto matricos įsiurbimo slėgis dėl grunte esančio vandens (Paulescu, 2014)

Grunto matricos įsiurbimo slėgis yra dydis priklausantis nuo vandens kiekio grunte, poringumo koeficiento ir drėgmės kiekio kitimo. Natūralios sedimentacijos smulkią smėlio matricos įsiurbimo slėgio ir turinio drėgnio grunte priklausomybę (1.11 pav.) pateikė Liakopulos (1965).



1.11 pav. Matricos išsiurbimo slėgio priklausomybė nuo tūrinio drėgnio smėlyje (Liakopulos, 1965)

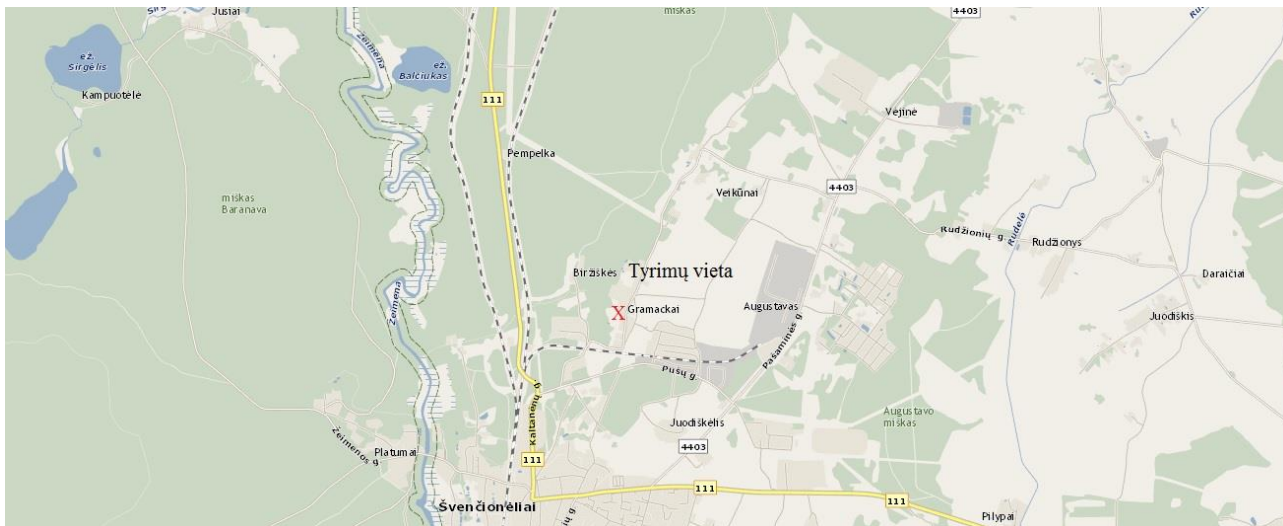
Iš grafiko (1.11 pav.) matyti, kad  $(u_a - u_w)$ , priklauso nuo turinio vandens drėgnio ir vandens kiekio kitimo. Taip pat viršutinę  $\Theta \sim 0,30$  vnt.d. ir apatinę  $\Theta \sim 0,05$  vnt.d. ribas, kurios rodo, kad esant grunte turiniui vandens kiekiui  $<0,05$  vnt.d. grunte efektyvieji įtempiai prilyginami sauso grunto, o  $>0,30$  vnt.d. grunte esantys efektyvieji įtempiai veikia kaip prisotinto ar kapiliarinio pakilimo zonoje.

Apibendrinant literatūros apžvalgą, galima teigti, kad aeracijos zonoje esančio grunto efektyvusis geostatinis įtempis priklauso nuo smėlio porose esančio vandens kiekio, poringumo, tankio. Kintant turiniui drėgniui smėlyje nuo 5 iki 30%. atsiranda matricos išsiurbimo slėgis  $(u_a - u_w)$ , dėl kurio smėlio dalelės yra traukiamos viena prie kitos, atsiranda papildomi įtempiai grunte. Šie įtempiai didina grunto efektyvųjų geostatinį įtempį. Aeracijos zonoje pasirinktame grunto taške efektyvusis geostatinis įtempis bus didesnis už suminį efektyvųjų geostatinį įtempį  $\sigma' > \sigma$ .

## 2. Inžinerinės geologinės sąlygos

### 2.1. Geografinė padėtis

Grunto geostatinio įtempio tyrimai atlikti Gramackų k., Švenčionėlių sen., Švienčionių r. sav. esančiame sklype.



2.1 pav. Tyrimų vietos žemėlapis

Sklype įrengti 4 kasiniai pasirinktose vietose, kurių vietų koordinatės ir altitudės nurodytos 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Kasinių koordinatės ir altitudės

Kasinio Nr.	Koordinatės		Absoliutinis aukštis, m
	X	Y	
Kasins Nr.1	~ 6118029,0	~ 627853,0	~ 152,70
Kasins Nr.2	~ 6118020,0	~ 627847,0	~ 156,90
Kasins Nr.3	~ 6118017,0	~ 627833,0	~ 156,50
Kasins Nr.4	~ 6118017,0	~ 627824,0	~ 156,20

## 2.2. Geologinės ir geomorfologinės sąlygos

Geomorfologiniu požiūriu vietovė yra šiaurričių lygumos rajone, Žeimenos lygumos parajonyje, Palūšės terasuotos fluvio-glacialinės lygumos mikrorajone. Vyraujanti gruntų litojogija – įvairiagrūdžiai smėliai. Vyraujantis reljefo tipas – fluvio-glacialinės lygumos, suformuotos po paskutinio apledėjimo.

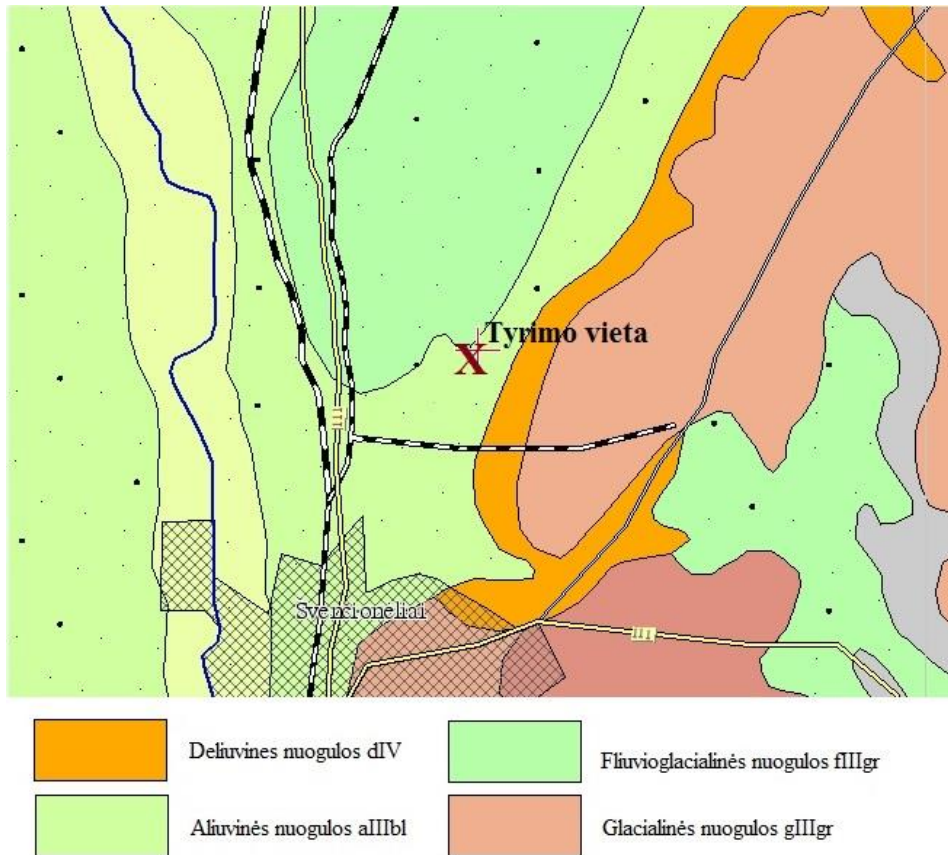
Bandytųjų aikštelės stovymėje yra išskirtos holoceno nuogulos kurias sudaro trijų tipų nuogulos, tai:

Dirvožemis (pdIV), slūgsantis kasiniuose Nr.2-4, iki 0,3 m gylio.

Technogeninis gruntas (tIV), slūgsantis kasinio Nr.1 zonoje iki 0,5 m gylio.

Aliuvinės nuogulos (aIIIb1), slūgsančios iki kasiniais pasiekto 1,8 – 2,0 m gylio.

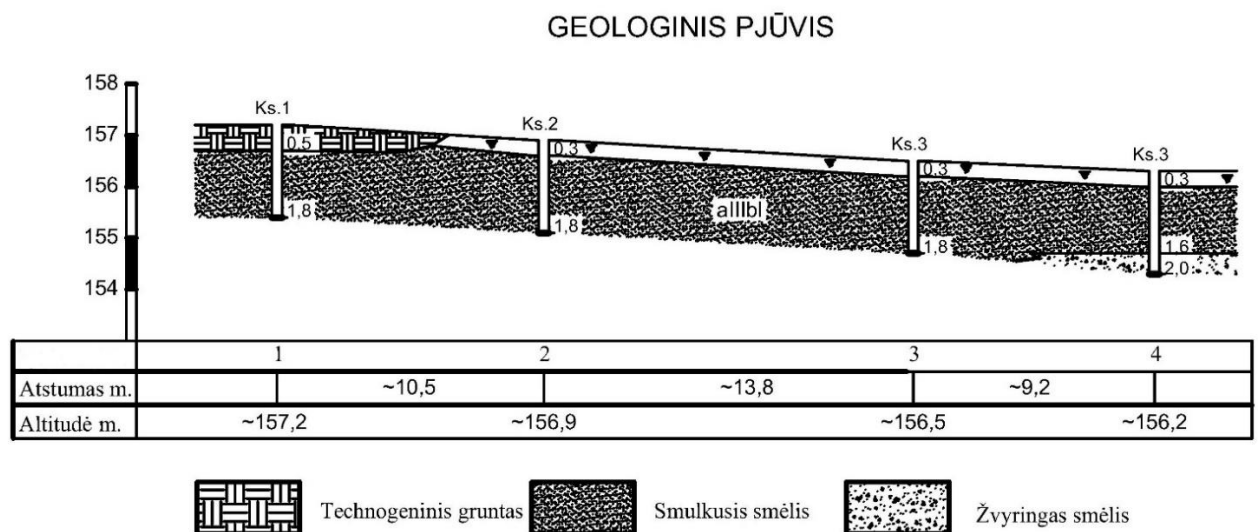
Tyrimų vieta kvartero geologiniame žemėlapyje pavaizduota 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Vietovės kvartero geologinis žemėlapis

(<https://www.lgt.lt/zemlap/main.php?sesName=lgt1458225734>)

Numatytuose tyrimo vietose iškasus kasinius, juos apsiraišius, ir laboratorijoje nustatčius granulimetrinę gruntų sudėtį sudarytas aikštelės geologinis pjūvis (2.3 pav.)



2.3 pav. Tiriamo sklypo geologinis pjūvis



## 2.3. Inžinerinės geologinės ir hidrogeologinės sąlygos

Tyrimų plote tirtos trijų tipų nuogulos, tai dirvožemis, piltinis gruntas ir smulkusis smėlis. Viršutinę sklypo dalį iki 0,3 m gylio dengia dirvožemis. Dirvožemis sudarytas iš smulkiojo smėlio bei juodžemio. Išmatuotas gamtinis tankis kinta nuo 1,30 iki 1,32 Mg/m<sup>2</sup>, drėgnis 11–15%. Technogeninis gruntas sutiktas tik viename kasinyje iki 0,5 m gylio. Šį gruntą sudaro vidutinio rupumo smėlis su juodžemio priemaiša. Dėl kaitaus juodžemio kiekio ir nevienalytiškumo natūralus tankis kinta dideliame intervale 1,28–1,47 Mg/m<sup>2</sup>, drėgnis apie 15%. Po dirvožemiu ir technogeniniu gruntu sutinkamas smulkusis smėlis. Smulkiajame smėlyje vyrauja vienos frakcijos grūdėliai, todėl yra vienodos sanklodos. Gamtinis šio grunto tankis kinta nuo 1,51 iki 1,81 Mg/m<sup>2</sup>, drėgnis 7–8%.

Požeminio vandens 1,8–2,0 m gylio kasiniais nesutikta. Pagal netoliese esamus šulinius vietovės gruntinis vanduo sutinkamas 7–9 m gylyje nuo žemės paviršiaus.

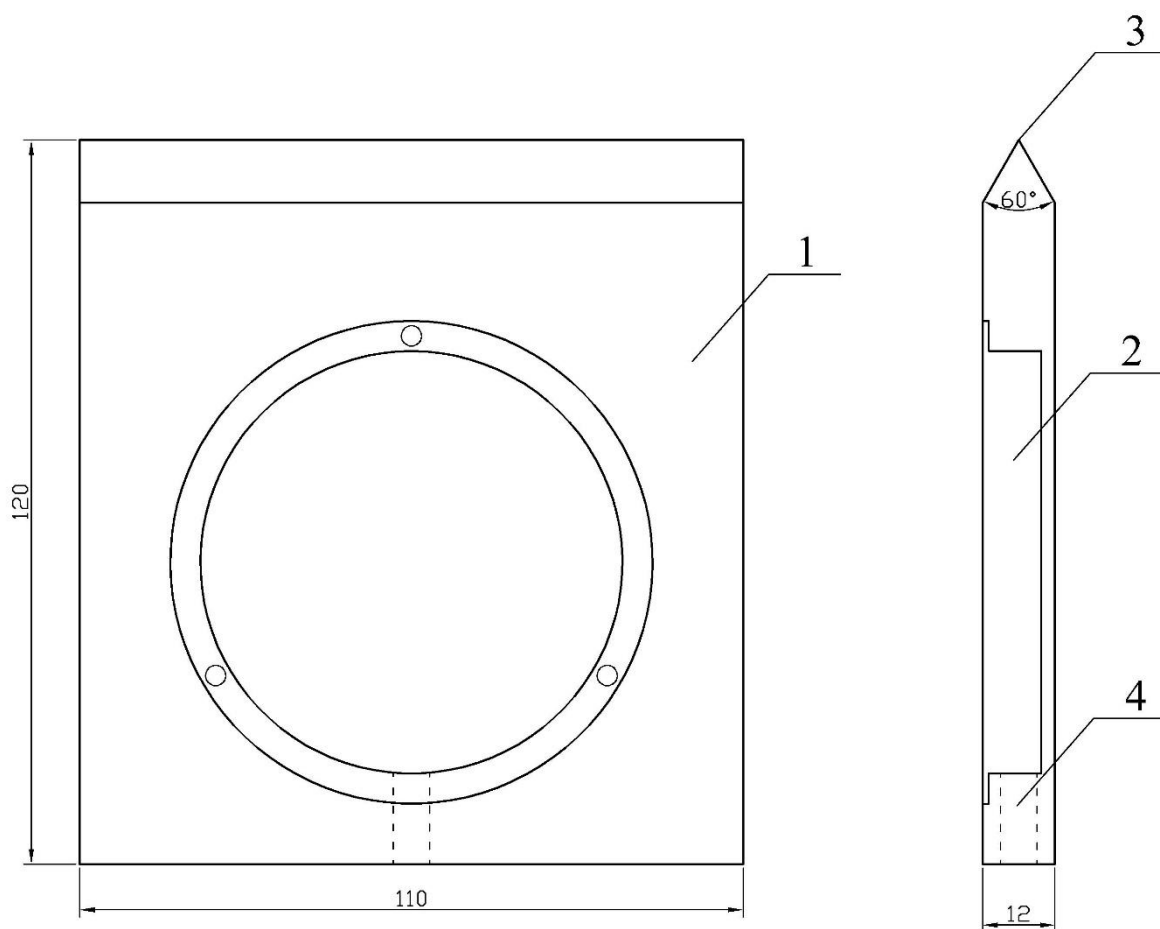
## 3. Bandymų metodika

Vertikalaus geostatinio įtempio matavimui buvo sukonstruoti tam reikalingi įrangos elementai:

- grunto vertikalaus geostatinio įtempio matavimo įranga;
- matavimo duomenų pateikimo įranga;
- spaudimo įranga;
- bandinių paėmimo įranga.

### 3.1. Bandymų įranga

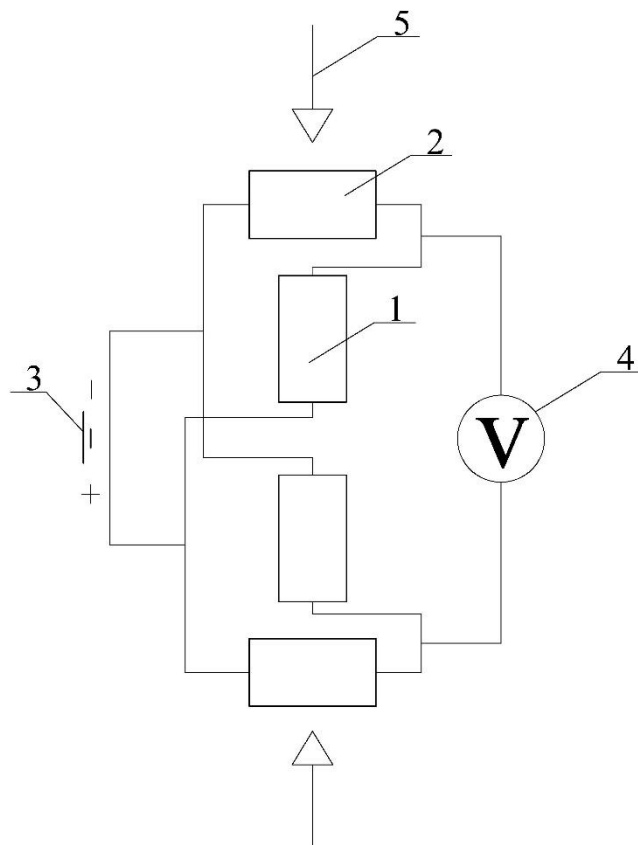
Bandymas grunte atlikti buvo sukonstruotas prietaisas matuojantis grunto sukeltą slėgį. Pagrindinės prietaisą sudarančios dalys yra šios: plieninis korpusas, plieninė membrana, tenzodavikliai ir laidai (3.1 pav.).



3.1 pav. Matavimo prietaiso schema: 1 – plieninis korpusas, 2 – ertmė, 3 – ašmenys, 4 – ertmė laidams

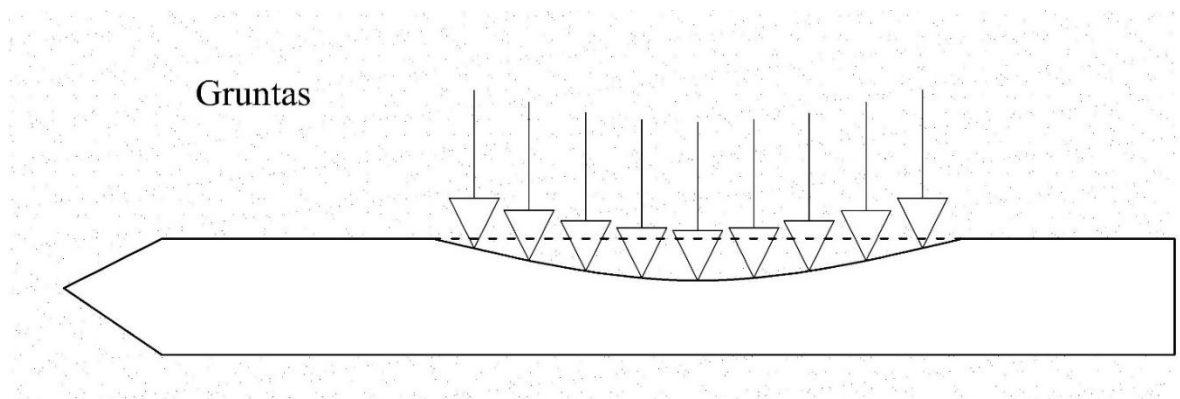
Korpusas pagamintas iš plieno 3 klasės metalo plokštės, kurios ilgis 120 mm, plotis 110 mm, storis 12 mm. Centre išfrezuota apskritimo formos ertmė, 80 mm skersmens, (3.1 pav. 2) skirta plieninei membranai ir elektros įrangai sumontuoti. Viename šone padarytos ašmenys (3.1 pav. 3), kurių kampas  $60^\circ$ . Šios ašmenys suformuotos norint palengvinti prietaiso spraudimą į gruntą, bei sumažinti grunto ardymą bei deformacijas spraudimo metu.

Prietaiso veikimo principas paremtas grunto slėgio sukeltų metalo deformacijų matavimo tenzodaviklių pagalba (3.2 pav.). Tenzodaviklis – daviklis, kurio elektrinės varžos pokytis proporcingas kietojo kūno deformacijai (Hannah, Reed 1992). Šiuo atveju kietas kūnas yra 1 mm storio ir 40 mm skersmens plieninė membrana, kuri paveikta grunto sukulto slėgio deformuojasi. Deformuodamasi membrana proporcingai keičia ant jos esančių tenzodaviklių varžą. Didėjant membranos deformacijai tenzodaviklių varža mažėja, mažėjant deformacijai - varža didėja. Šiuos du veiksnius veikia atvirkštinė priklausomybė.



3.2 pav. Tenzodaviklių išdėstymo ant plieninės membranos schema: 1 – tenzodaviklis ( $400\Omega$ ), 2 – termokompensacinis tenzodaviklis ( $400\Omega$ ), 3 – įtampos šaltinis (12V), 4 – voltmetras, 5 – membranos deformacijos kryptis.

Įsraudus prietaisą į gruntą, virš jo esantis gruntas dėl savo svorio sukelia slėgį į membraną (3.3 pav.). Dėl slėgio atsiradimo membrana deformuojasi – įlinksta. Deformacijos dydis yra proporcingas grunto sukulto slėgio į plieninę membraną, dėl to atsiranda tiesioginis ryšys tarp membranos įlinkio dydžio ir grunto sukulto slėgio.



3.3 pav. Membranos padėtis grunte

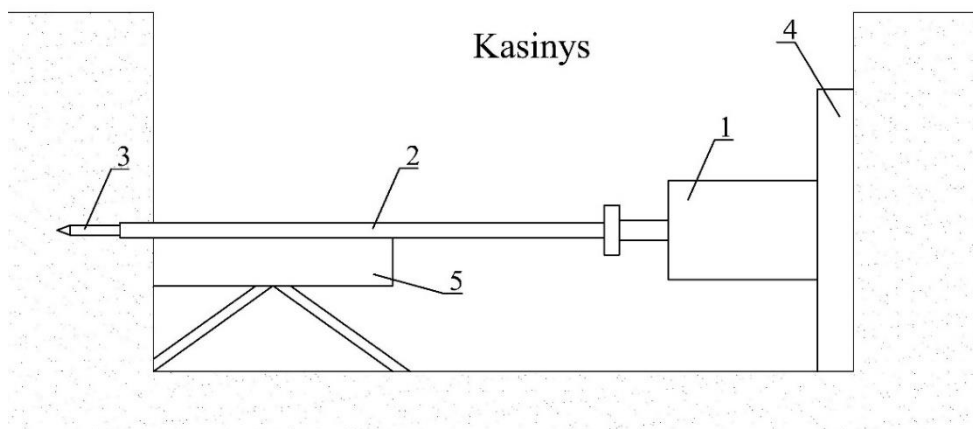
Grunto įtempio matavimo įranga (3.4 pav.) pagal savo konstrukcinius elementus ir veikimo principą panaši į tenzometrinį statinį zondą, todėl pateikti duomenis buvo panaudota statinio zondavimo įranga, kurios viduje sumontuoti voltmetrai. Voltmetrai matuoja grandinėje tekančia srovę, kurios dydį keičia matavimo prietaise esantys tenzodavikliai.



3.4 pav. Matavimo ir duomenų pateikimo įranga

Matavimo įrangos išspaudimui (3.5 pav.) į gruntą kasinyje buvo sumontuojami šie konstrukciniai elementai:

- Hidraulinis domkratas Tongrun T91004, keliamoji galia 10,0 t;
- Įvairūs spaudimo strypai;
- Medinės atramos.



3.5 pav. Spaudimo įranga: 1 – hidraulinis domkratas, 2 – strypai, 3 – matavimo prietaisas, 4 – vertikali atrama, 5 – horizontali atrama.

Kasinyje prie vienos iš sienelių pritvirtinama vertikali atrama ir domkratas. Vertikali atrama naudojama kaip standus pagrindas domkratui, norint išvengti nukrypimo bei apsaugoti kasinio sienelę nuo suardymo. Priešingoje kasinio pusėje sumontuojama horizontali atrama. Šios atramos paskirtis užtikrinti pastovų horizontalų ir vertikalų prietaiso spaudimą nenukrypstant nuo pasirinktos krypties. Prietaisas jungtėmis pritvirtinamas prie spaudimo strypų, padedamas ant horizontalios atramos ir domkrato pagalba spraudžiamas į gruntą. Spraudimo greitis apie 3 mm/s. Spraudžiant nuolatos tikrinami strypai ar neatsirado vertikalus nuokrypis.

Tiriamo smėlinio grunto fizikinių parametrų nustatymui buvo imami bandiniai. Bandiniai imti naudojant dviejų rūšių žiedus: 50 mm aukščio ir 30 mm skersmens bei 150 mm aukščio ir 110 mm skersmens. Pirmieji, mažesnių matmenų žiedai buvo naudojami paimti nesuardytos sandaros bandinį iš technogeninio grunto ir dirvožemio. Didesnių matmenų žiedai buvo naudojami paimti didesnę tūrį nesuardytos sandaros smėlio bandinius.

### 3.2. Efektyviųjų įtempių skaičiavimo metodika

Suminis vertikalus geostatinis įtempis 1,0 ir 1,5 m gylio taškuose apskaičiuojamas sumavimo metodu (1.10), sumuojant kiekvieno 0,3 m storio grunto sluoksnelio vertikalųjį geostatinį įtempį (1.9) iki 1,0 ir 1,5 m gylių. Efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis pagal Terzaghi efektyviųjų įtempiu teorija mažai drėgnuose gruntuose priimamas kaip skaičiavimo metodu gautas suminis vertikalus geostatinis įtempis  $\sigma' = \sigma$ .

Kiekvienam gylio intervalui kuriam išmatuojamas gamtinis tankis ( $\rho$ ) ir apskaičiuojamas savitasis sunkis ( $\gamma$ ), nustatomas šio intervalo vertikalus geostatinis įtempis  $\sigma$  (kPa), pagal formulę 3.1.

$$\sigma = \gamma \cdot h, \quad (3.1)$$

čia,  $\sigma$  – apskaičiuotas vertikalus geostatinis įtempis (kPa),  $\gamma$  – savitasis sunkis (kN/m<sup>3</sup>),  $h$  – grunto sluoksnelio storis (pastovus 0,1 m storis)

Efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis  $\sigma^*$  aeracijos zonoje apskaičiuojamas nuo išmatuoto suminio vertikalaus geostatinio įtempio, pagal Bishopo teoriją (1.15) bei supaprastintą Aitchinson (1.16) bei Jennings teoriją (1.17).

$$\sigma^{*'} = \sigma^* + \beta p'', \quad (3.2)$$

čia,  $\sigma^{*'}$  – apskaičiuotas efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis nuo tiesiogiai išmatuoto suminio vertikalaus geostatinio (kPa),  $\sigma^*$  – išmatuotas efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis (kPa),  $\beta$  – parametras nustatomas eksperimentiškai,  $p''$  – porinio vandens slėgio modulis (kPa)

Formulėje 3.2 esantis koeficientas  $\beta$  atitinka Bishop teorijos koeficientą  $\chi$ , kuris priimamas iš grunto soties vandeniui ( $S_r$ ) priklausomybės (1.9 pav.). Porinio slėgio modulis šiuo atveju gruntui esant aeracijos zonoje veikia kaip matricos išsiurbimo slėgis ir priklausomas nuo turinio vandens kiekio grunte, nustatomas iš priklausomybės (1.11 pav.)

Tiesioginio vertikalaus geostatinio įtempio matavimo prietaisas sukalibruotas taip, kad matuotų grunto sukeltą slėgį į ploto vienetą. 1000 reikšmė gauta matuojant atitinka 0,2 atmosferas, 2000 – 0,2 atmosferas ir t.t. Tad norint gauti grunto sukeltą slėgį reikia naudoti formulę 3.3.

$$atm = \frac{\text{matavimo rezultatas}}{10000}, \quad (3.3)$$

Atmosfera yra sukeltas slėgis į ploto vienetą. Viena atmosfera atitinka 101,32 kPa. Remiantis atitikimu grunto išmatuotą slėgį galima perskaičiuoti į suminį vertikalųjį geostatinį įtempį, kuris veikia į ploto vienetą, pagal priklausomybę 3.4.

$$\sigma^* = atm \cdot 101,32, \quad (3.4)$$

čia,  $\sigma^*$  – tiesioginiu matavimu išmatuotas suminis geostatinis įtempis (kPa), atm – grunto slėgis (atm)

Turinis vandens kiekis. Šis dydis parodo koki tūri vanduo užima poruose visoje grunto terpėje. Apskaičiuojamas pagal formulę 3.5.

$$\Theta = \frac{w}{1-w} \cdot \rho, \quad (3.5)$$

čia,  $\Theta$  – tūrinis drėgnis (vnt.d.)  $\rho$  – grunto gamtinis tankis ( $\text{Mg/m}^3$ ),  $w$  – grunto drėgnis (vnt.d.)

Soties laipsnio nustatymas. Rupiųjų gruntų prisotinimo vandenių laipsnį apibūdina soties laipsnis  $S_r$  (vnt.d.). Jis parodo grunto porų užpildymo vandenių santykinį dydį, t. y. kokią porų tūrio dalį užima vanduo (Prūšinskienė, 2012). Soties laipsnį galima apskaičiuoti pagal 3.6 formulę.

$$S_r = \frac{w\rho_s(1-n)}{n}, \quad (3.6)$$

čia,  $S_r$  – soties laipsnis (vnt.d.),  $\rho_s$  – kietųjų dalelių tankis ( $\text{Mg/m}^3$ ),  $w$  – grunto drėgnis (vnt.d.),  $n$  – poringumas (vnt.d.)

Poringumas  $n$  (Vnt. d.) parodo grunto porų tūrį jo tūrio vienetu. Gruntų poringumas apskaičiuojamas pagal 3.7 formulę.

$$n = 1 - \frac{\rho}{\rho_s(1+w)}, \quad (3.7)$$

čia,  $n$  – poringumas (vnt.d.)  $\rho$  – gamtinis tankis ( $\text{Mg/m}^3$ ),  $\rho_s$  – kietųjų dalelių tankis ( $\text{Mg/m}^3$ ),  $w$  – grunto drėgnis (vnt.d.)

Tankio nustatymas. Grunto tankį  $\rho$  ( $\text{Mg/m}^3$ ) apibūdina grunto masės santykis su jo tūriu. Smėlių tankis nustatomas žiedo metodu pagal 3.8 formulę.

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3.8)$$

čia,  $\rho$  – gamtinis tankis ( $\text{Mg/m}^3$ ),  $m$  – grunto masė žiede ( $\text{Mg}$ );  $V$  – žiedo tūris ( $\text{m}^3$ ).

Pagal nustatytą gamtinį tankį apskaičiuojamas technogeninio grunto ir smulčio smėlio savitasis sunkis  $\gamma$  ( $\text{kN/m}^3$ ), apskaičiuojamas pagal formulę 3.9.

$$\gamma = \rho \cdot g, \quad (3.9)$$

čia,  $\gamma$  – savitasis sunkis ( $\text{kN/m}^3$ ),  $\rho$  – gamtinis tankis ( $\text{Mg/m}^3$ ),  $g$  – laisvo kritimo pagreitis, lygus  $9,8 \text{ m/s}^2$

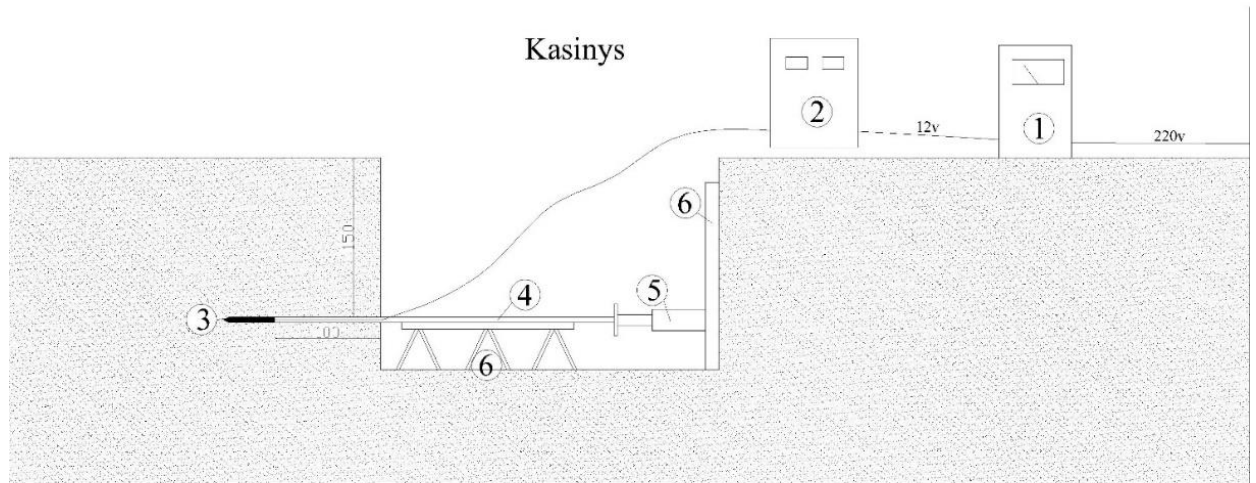
### 3.3. Bandymo eiga

Kaip jau buvo minėta, geostatinio įtempio matavimai buvo atlikti Gramackų kaime. Čia tyrimams buvo iškasti keturi kasiniai, tarp kurių atstumas buvo 5 m, tam, kad išvengti vieno kasinio įtakos kitam.

Altitudžių skirtumas tarp kasinių nedidesnis nei 0,5 m, nes esant dideliame žemės paviršiaus nelygumui gali kisti matavimo rezultatai. Įvertinus atstumą ir aukščių skirtumą parenkamos tinkamiausios vietos kasiniams.

Kasant kasinius buvo imami nesuardytos sandaros smėlio bandiniai. Technogeninio grunto imami po 1–3 bandiniai, 0,2–0,3 m intervalu. Natūralaus smėlio imamas vienas bandinys iš kiekvieno 0,3 m intervalo. Toks intervalas pasirenkamas pagal naudojamų žiedų aukštį. Kadangi žiedo aukštis 150 mm, imant nesuardytos sandaros grunto bandinį po juo esantis gruntas suyra, todėl optimaliausias bandinių paėmimo intervalas 0,3 m.

Iškasus kasinius, juose sumontuojama matavimo (3.1 pav.), spaudimo (3.4 pav.) ir duomenų pateikimo įranga (3.5 pav.). Supaprastinta viso matavimo schema pavaizduota 3.6 paveiksle.

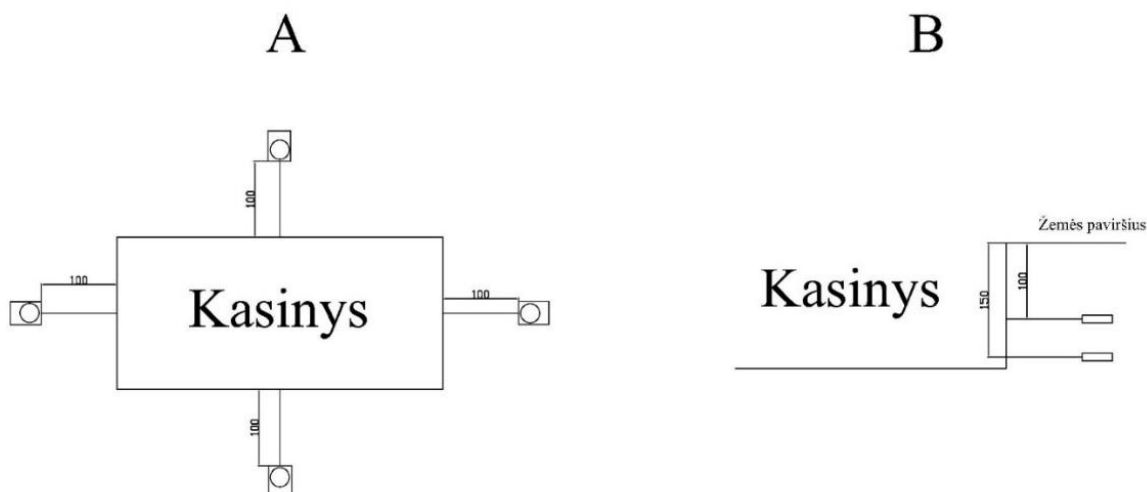


3.6 pav. Bandymo kasinyje schema: 1 – reguliuojamas įtampos šaltinis, 2 – matavimo įranga, 3 – geostatinio įtempio matavimo prietaisas, 4 – spaudimo strypai, 5 – domkratas, 6 – vertikalios ir horizontalios atramos.

Sumontavus ir patikrinus įrangą kasinyje buvo atliekamas spaudimas. Matavimo prietaisas spaudžiamas į keturias priešingas kasinio sienelės, po 1,0 metrą statmenai sienelėi. Spaudimo metu nuolat stebimas nukrypimas nuo horizontalios ašies. Pastebėjus nukrypimą



bandymas stabdomas ir kartojamas iš naujo. Matavimai atliekami kasiniuose 1,0 m ir 1,5 m gylyje nuo esamo žemės paviršiaus (4.7 pav.).



4.7 pav. Matavimų išdėstymas kasinyje. A – išdėstymas plane, B – išdėstymas pjūvyje.

Prietaisui pasiekus 1,0 m atstumą nuo kasinio sienelės spaudimas stabdomas ir paliekamas 5 – 10 minučių. Praėjus laiko tarpui įjungiamas prietaisas ir stebimi jo rodmenys. Jei matavimo reikšmės kinta, tuomet laukiama ilgiau – kol nusistovės. Reikšmė užfiksuojama jei per 10 minučių nepakinta daugiau už 3 matavimo vienetus. Reikšmių pasikeitimą įtakoja prietaiso ir grunto temperatūrinis skirtumas. Matavimo prietaisui įgavus grunto temperatūrą nustoja kisti reikšmės.

Vadovaujantis aukščiau aprašytu principu, ši bandymo eiga viename kasinyje yra kartojama keturis kartus 1,0 m gylyje ir keturis kartus 1,5 m gylyje nuo esamo paviršiaus. Iš viso viename kasinyje atliekami 8 matavimai ir paimami 5 – 7 nesuardytos sandaros bandiniai. Iš viso 4 kasiniuose atlikta 29 matavimai ir 23 nesuardytos sandaros grunto bandiniai.

### 3.4. Laboratoriniai tyrimai

Kasinių iškasus bandymų kasinius iš jų sienelės buvo paimti grunto bandiniai laboratoriniams tyrimams. Šie tyrimai buvo atlikti Vilniaus Universiteto, Gamtos mokslų fakulteto, Hidrogeologijos ir inžinerinės geologijos katedros inžinerinės geologijos laboratorijoje. Tyrimų metu buvo nustatyta grunto granulimetrinės sudėtis, gamtinis drėgnis ir kietųjų dalelių tankis.

**Gruntų granulimetrinė analizė sietų metodu** – LST EN ISO/TS 17892-4:2005. Granulimetrinės sudėties tyrimų rezultatai vaizduojami grafiškai – sudarant granulimetrinės

sudėties kreives Pagal granulimetrinę kreivę apskaičiuojami grunto vienodumo (rūšiuotumo) koeficientą 3.10.

$$C_u = d_{60}/d_{10}, \quad (3.10)$$

čia,  $C_u$  – rūšiuotumo koeficientas,  $d_{10}$  ir  $d_{60}$  – dalelių skersmuo, už kurias mažesnių grunte yra atitinkamai 10% ir 60%.

ir grunto granulimetrinės sudėties kreivės (sanklodos) koeficientą 3.11.

$$C_c = d_{30}^2/(d_{10} \cdot d_{60}), \quad (3.11)$$

čia,  $C_c$  – sanklodos koeficientas,  $d_{10}$ ,  $d_{30}$  ir  $d_{60}$  – dalelių skersmuo, už kurias mažesnių grunte yra atitinkamai 10%, 30% ir 60%.

$C_u$  ir  $C_c$  koeficientų dydžius lemia granulimetrinės kreivės forma (jos statusas). Pagal juos nustatoma gruntų sankloda (EN ISO 14688-2:2002; 4.3):

- nuosekli ( $C_u > 15$ ;  $1 < C_c < 3$ ),
- vidutiniškai nuosekli ( $6 < C_u < 15$ ;  $C_c < 1$ );
- vienoda ( $C_u < 6$ ;  $C_c < 1$ ),
- pakopinė ( $C_u$  – paprastai didelis;  $C_c$  – bet koks).

**Gruntų natūraliojo drėgnio nustatymas** – LST EN ISO/TS 17892-1:2005. Grunto drėgnis apskaičiuojamas pagal formulę 3.12.

$$w = \frac{m - m_s}{m_s}, \quad (3.12)$$

čia,  $w$  – drėgnis (vnt.d.)  $m$  – natūralaus grunto masė (Mg),  $m_s$  – kietųjų dalelių (išdžiovinto grunto) masė (Mg).

**Grunto kietųjų dalelių tankio nustatymas piknometru** – LST EN ISO/TS 17892-3:2005. Kietųjų dalelių tankio nustatymui naudojamas išdžiovintas ir susmulkintas gruntas. Bandinys įberiamas į piknometrą, į jį pripilama pusė indelio distiliuoto vandens ir virinama. Baigus virti į piknometrą įpilama distiliuoto vandens iki ant indelio pažymėto brūkšnelio ir pasveriamas. Kietųjų dalelių tankis apskaičiuojamas pagal formulę 3.13.

$$\rho_s = \frac{m_{ts} - m_t}{m_{tw} + m_{ts} - m_t - m_{tw_s}}; \quad (3.13)$$

čia,  $\rho_s$  – kietųjų dalelių tankis ( $\text{Mg/m}^3$ ),  $m_{ts}$  – piknometro ir grunto masė ( $\text{Mg}$ ),  $m_t$  – piknometro masė ( $\text{Mg}$ ),  $m_{tw}$  – piknometro užpildytu vandeniu masė ( $\text{Mg}$ ),  $m_{tw_s}$  – piknometro su gruntu ir užpildytu vandeniu masė ( $\text{Mg}$ )

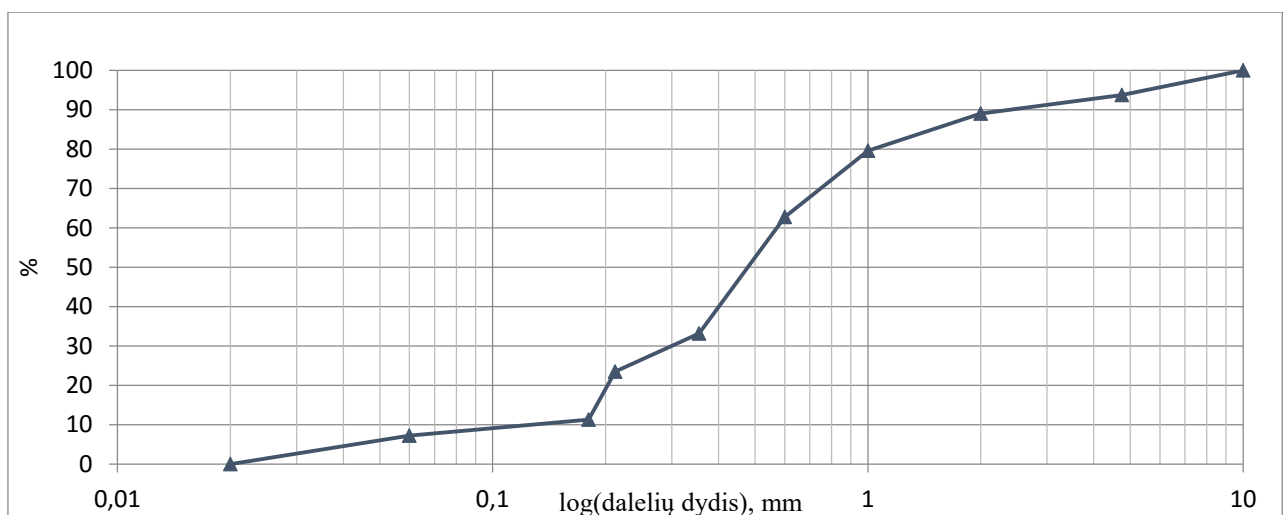
## 4. Tyrimų rezultatai

### 4.1. Grunto savybės

**Kasiny Nr.1.** Kasinyje iki 0,5 m gylio slūgso technogeninis gruntas, kuris sudarytas iš vidutinio rūpumo smėlio (MSa) (4.1 lentelė) su juodžemio priemaiša. Techniogeniniam gruntui nustatytas tankis, iki 0,2 m gylio, yra  $1,28 \text{ Mg/m}^3$ , o 0,2–0,5 m gylio intervale  $1,47 \text{ Mg/m}^3$ . Šio grunto nustatytas gamtinis drėgnis 12%.

4.1 lentelė. Technogeninio grunto frakcijų kiekiai

Dulkis	Smėlis						Žvyras	
	0,06-0,18	0,18-0,212	0,212-0,355	0,355-0,6	0,6-1,0	1,0-2,0	2,0-4,75	>4,75
7,2	4,12	12,17	9,64	29,6	16,86	9,41	4,76	6,24

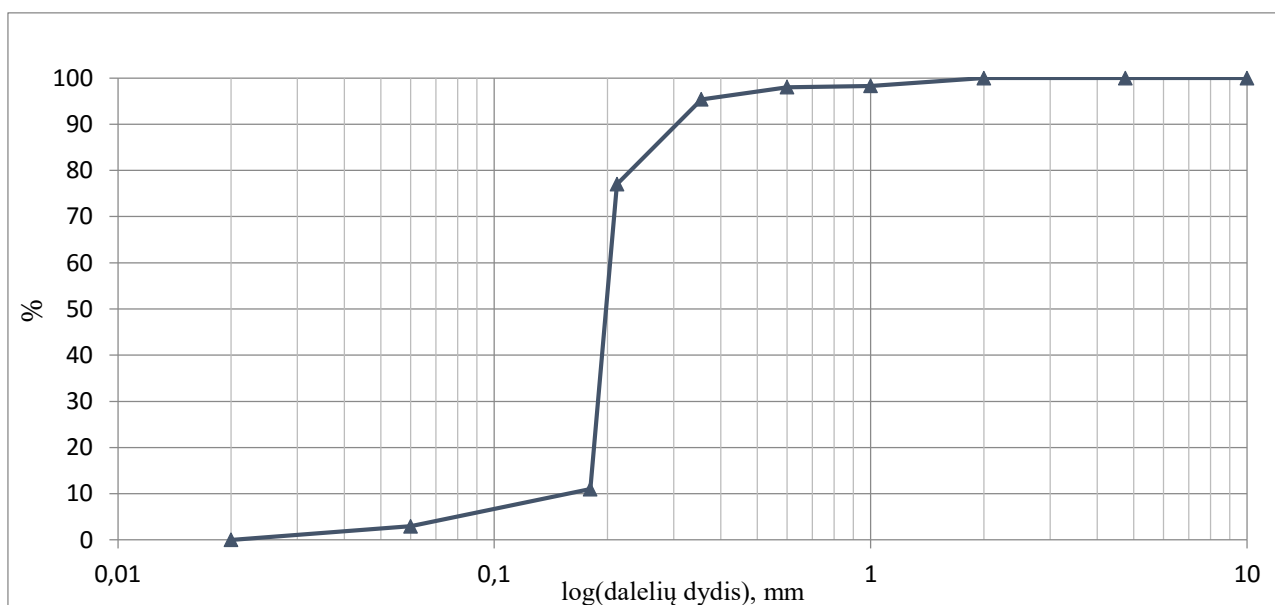


4.1 pav. Technogeninio grunto granulometrinės sudėties kumuliatyvinė kreivė, % - dalelių masė procentais

Po technogeniniu gruntu iki kasiniu pasiekto gylio (1,8 m), slūgso aliuvinės kilmės nuogulos (aIIIb1), kurias sudaro vienodos sanklodos smulkus smėlis (FSa). Grunto granuliometrinė sudėtis pateikta 4.2 lentelėje, o sanklodą apibūdinantys rodikliai pateikti 4.3 lentelėje. Nesuardytos sandaros smulkiojo smėlio gamtinis tankis 0,5–0,9 m gylio intervale – 1,68 Mg/m<sup>3</sup>; 0,9–1,2 m gylio intervale – 1,77 Mg/m<sup>3</sup>; 1,2–1,5 m gylio intervale - 1,72 Mg/m<sup>3</sup>. Nustatytas gamtinis drėgnis 8%, kietųjų dalelių tankis  $\rho_s$  – 2,65 Mg/m<sup>3</sup>.

4.2 lentelė. Smulkiojo smėlio frakcijų kiekiai

Dulkis	Smėlis						Žvyras	
	0,06-0,18	0,18-0,212	0,212-0,355	0,355-0,6	0,6-1,0	1,0-2,0	2,0-4,75	>4,75
2,96	8,03	66,03	18,38	2,61	0,28	1,71	0,00	0,00



4.2 pav. Smėlio granuliometrinės sudėties kumuliatyvinė kreivė, % - dalelių masė procentais

4.3 lentelė. Rūšiuotumo koeficientai

Rodiklis	Vertė
$d_{10}$	0,16
$d_{30}$	0,19
$d_{60}$	0,20
$C_u$	1,25
$C_u$	1,13

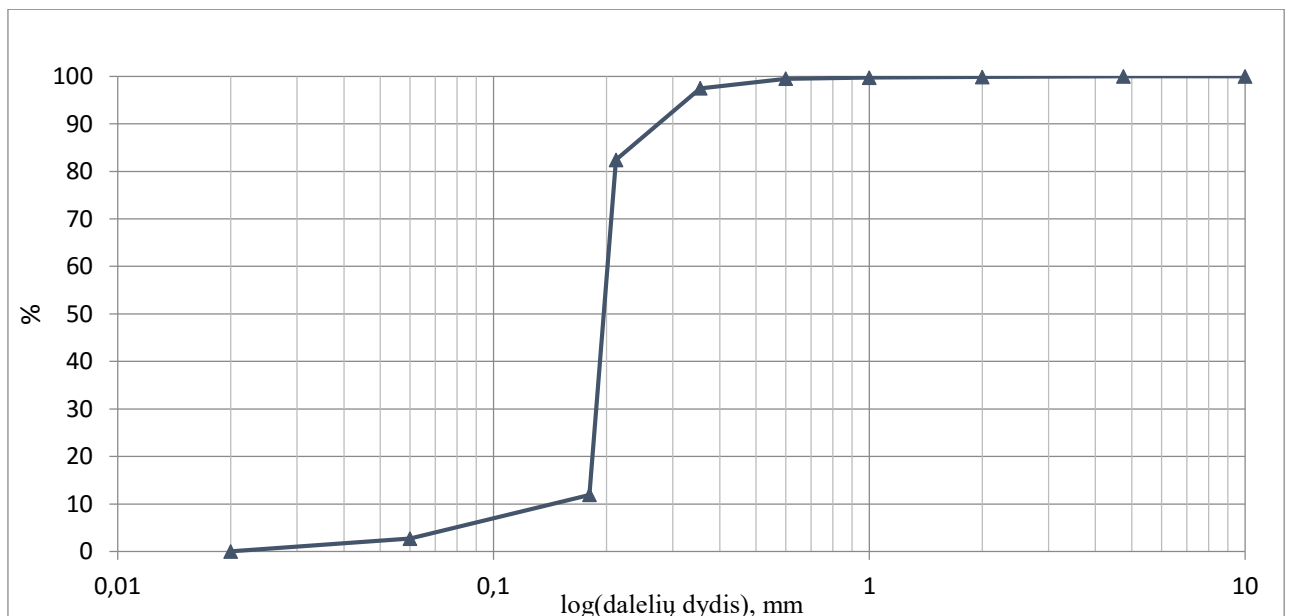
**Kasiny Nr.2.** Kasinyje iki 0,3 m gylio slūgso dirvožemis. Dirvožemiui nustatytas nesuardytos sandaros gamtinis tankis iki 0,3 m gylio 1,32 Mg/m<sup>3</sup>. Šio grunto nustatytas gamtinis

drėgnis 15%. Po dirvožemiu iki kasiniu pasiekto gylio (1.8 m) slūgso aliuvinės kilmės nuogulos (aIIIbl), kurias sudaro vienodos sanklodos smulkusis smėlis (FSa). Nesuardytos sandaros smulkiąjo smėlio gamtinis tankis 0,3–0,6 m gylio intervale – 1,58 Mg/m<sup>3</sup>; 0,6–0,9 m gylio intervale – 1,67 Mg/m<sup>3</sup>; 0,9–1,2 m gylio intervale – 1,70 Mg/m<sup>3</sup>; 1,2–1,5 m gylio intervale - 1,75 Mg/m<sup>3</sup>. Nustatytas gamtinis drėgnis 9%, kietųjų dalelių tankis  $\rho_s$  – 2,65 Mg/m<sup>3</sup>.

**Kasiny Nr.3.** Kasinyje iki 0,3 m gylio slūgso dirvožemis. Dirvožemiui nustatytas nesuardytos sandaros gamtinis tankis iki 0,3 m gylio 1,30 Mg/m<sup>3</sup>. Šio grunto nustatytas gamtinis drėgnis 15%. Po dirvožemiu iki kasiniu pasiekto gylio (1,8m) slūgso aliuvinės kilmės nuogulos (aIIIbl), kurias sudaro vienodos sanklodos smulkusis smėlis (FSa). Grunto granulimetrinė sudėtis pateikta 4.4 lentelėje, o sanklodą apibūdinantys rodikliai pateikti 4.5 lentelėje. Nesuardytos sandaros smulkiąjo smėlio gamtinis tankis 0,3–0,6 m gylio intervale – 1,65 Mg/m<sup>3</sup>; 0,6 – 0,9 m gylio intervale – 1,74 Mg/m<sup>3</sup>; 0,9–1,2 m gylio intervale – 1,78 Mg/m<sup>3</sup>; 1,2–1,5 m gylio intervale - 1,81 Mg/m<sup>3</sup>. Nustatytas gamtinis drėgnis 8%, kietųjų dalelių tankis  $\rho_s$  – 2,65 Mg/m<sup>3</sup>.

4.4 lentelė. Smulkiąjo smėlio frakcijų kiekiai

<0,06	0,06-0,18	0,18-0,212	0,212-0,355	0,355-0,6	0,6-1,0	1,0-2,0	2,0-4,75	>4,75
2,7	9,19	70,52	15,04	2,04	0,24	0,13	0,14	0,00



4.3 pav. Smėlio granulometrinės sudėties kumuliatyvinė kreivė, % - dalelių masė procentais

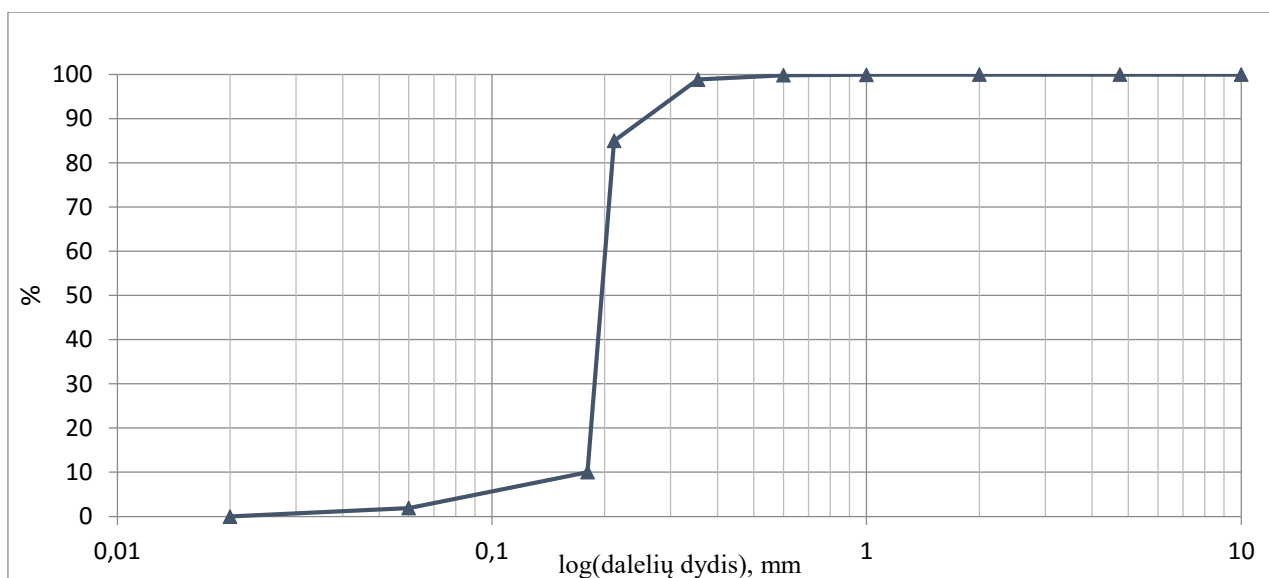
4.5 lentelė. Rūšiuotumo koeficientai

Rodiklis	Vertė
$d_{10}$	0,15
$d_{30}$	0,19
$d_{60}$	0,20
$C_u$	1,33
$C_c$	1,20

**Kasiny Nr.4.** Kasinyje iki 0,3 m gylio slūgso dirvožemis. Dirvožemiui nustatytas nesuardytos sandaros gamtinis tankis iki 0,3 m gylio  $1,30 \text{ Mg/m}^3$ . Šio grunto nustatytas gamtinis drėgnis 15%. Po dirvožemiu iki 1,6 m gylio slūgso aliuvinės kilmės nuogulos (aIIIbl), kurias sudaro vienodos sanklodos smulkusis smėlis (FSa). Grunto granulimetrinė sudėtis pateikta 4.6 lentelėje, o sanklodą apibūdinantys rodikliai pateikti 4.7 lentelėje. Nesuardytos sandaros smulkiojo smėlio gamtinis tankis 0,3–0,6 m gylio intervale –  $1,51 \text{ Mg/m}^3$ ; 0,6–0,9 m gylio intervale –  $1,63 \text{ Mg/m}^3$ ; 0,9–1,2 m gylio intervale –  $1,66 \text{ Mg/m}^3$ ; 1,2–1,5 m gylio intervale –  $1,67 \text{ Mg/m}^3$ . Nustatytas gamtinis drėgnis 8%, kietųjų dalelių tankis  $\rho_s$  –  $2,65 \text{ Mg/m}^3$ .

4.6 lentelė. Smulkiojo smėlio frakcijų kiekiai

Dulkis	Smėlis						Žvyras	
<0,06	0,06-0,18	0,18-0,212	0,212-0,355	0,355-0,6	0,6-1,0	1,0-2,0	2,0-4,75	>4,75
1,89	8,14	74,95	13,89	0,98	0,1	0,04	0,01	0,00



4.4 pav. Smėlio granulometrinės sudėties kumuliatyvinė kreivė, % - dalelių masė procentais

4.7 lentelė. Rūšiuotumo koeficientai

Rodiklis	Vertė
$d_{10}$	0,18
$d_{30}$	0,19
$d_{60}$	0,20
$C_u$	1,11
$C_c$	1,00

Po smulkiuoju smėliu iki kasiniu pasiekto 2,0 m gylio slūgso žvyringas smėlis. Kadangi žvyringas smėlis neturės įtakos tyrimų ir matavimų rezultatams, todėl šio grunto nebuvo imti bandiniai ir nenustatinėtos fizikinės savybės.

## 4.2. Suminio ir efektyviojo vertikalus geostatinio įtempio skaičiavimas

**Kasinyje Nr.1** pagal 3. skyriuje aprašytą metodiką nustatyti gruntų tankiai (3.8), apskaičiuoti savitieji sunkiai (3.9) ir suminiai vertikalieji įtempiai (3.1). Grunto masyvo suminis vertikalus geostatinis įtempis apskaičiuotas pagal 1.9 formulę. Gauti skaičiavimų rezultatai pateikti 4.8 lentelėje. Mėlyna spalva pažymėtuose langeliuose suminio vertikalus geostatinio įtempio reikšmės 1,0 ir 1,5 m gyliuose. Šios reikšmės išskirtos, nes bus lyginamos su tiesioginio bandymo metu išmatuoto suminio vertikalus geostatinio įtempio reikšmėmis.

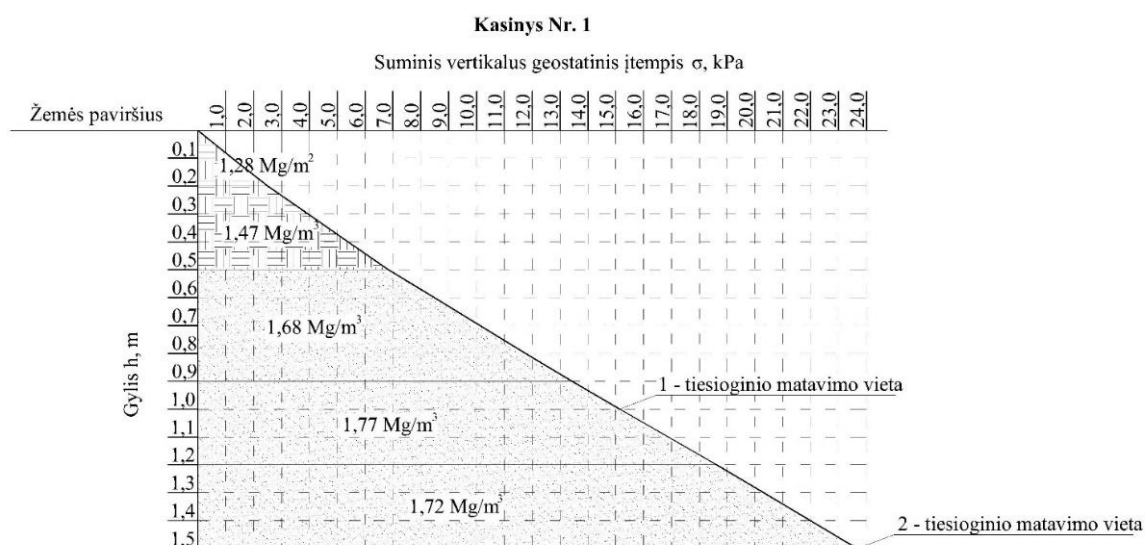
4.8 lentelė. Kasinyje Nr.1 apskaičiuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis

Gruntas	Gylis h, m	Tankis $\rho$ , $Mg/m^3$	Savitasis sunkis $\gamma$ , $kN/m^3$	Sluoksniu suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma$ , kPa	Grunto masyvo suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma$ , kPa
Technogeninis gruntas	0,1	1,28	12,54	1,25	1,25
	0,2	1,28	12,54	1,25	2,51
	0,3	1,47	14,41	1,44	3,95
	0,4	1,47	14,41	1,44	5,39
	0,5	1,47	14,41	1,44	6,83
Smulkusis smėlis	0,6	1,68	16,46	1,65	8,48
	0,7	1,68	16,46	1,65	10,12
	0,8	1,68	16,46	1,65	11,77
	0,9	1,68	16,46	1,65	13,42

#### 4.8 lentelės tęsinys

Smulkusis smėlis	1,0	1,77	17,35	1,73	15,15
	1,1	1,77	17,35	1,73	16,89
	1,2	1,77	17,35	1,73	18,62
	1,3	1,72	16,86	1,69	20,31
	1,4	1,72	16,86	1,69	21,99
	1,5	1,72	16,86	1,69	23,68

Pagal gautus duomenis nubraižomas suminio vertikalaus geostatinio įtempio priklausomybės nuo gylio grafikas (4.5 pav.)



4.5 pav. Apskaičiuoto suminio vertikalaus geostatinio įtempio priklausomybės nuo gylio grafikas

Grafike (4.5 pav.) ant suminio vertikalaus geostatinio įtempio priklausomybės nuo gylio linijos pažymėti taškai 1 ir 2. Šie pažymėti taškai nurodo kuriuose gyliuose kasinyje Nr.1 atliktas tiesioginio matavimo bandymas.

Efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis 1,0 ir 1,5 m gyliuose priimamas lygus suminiam vertikaliajam įtempiui  $\sigma' = \sigma$ . Ši lygybė priimama pagal Terzaghi efektyviųjų įtempių teorija, kadangi tiriamas gruntas yra aeracijos zonoje ir nėra pilnai išotintas vandeniu ( $S_r \neq 1$ ). Gauname kad  $\sigma'$  1,0 m gylyje yra 15,15 kPa, o 1,5 m gylyje yra 23,68 kPa.

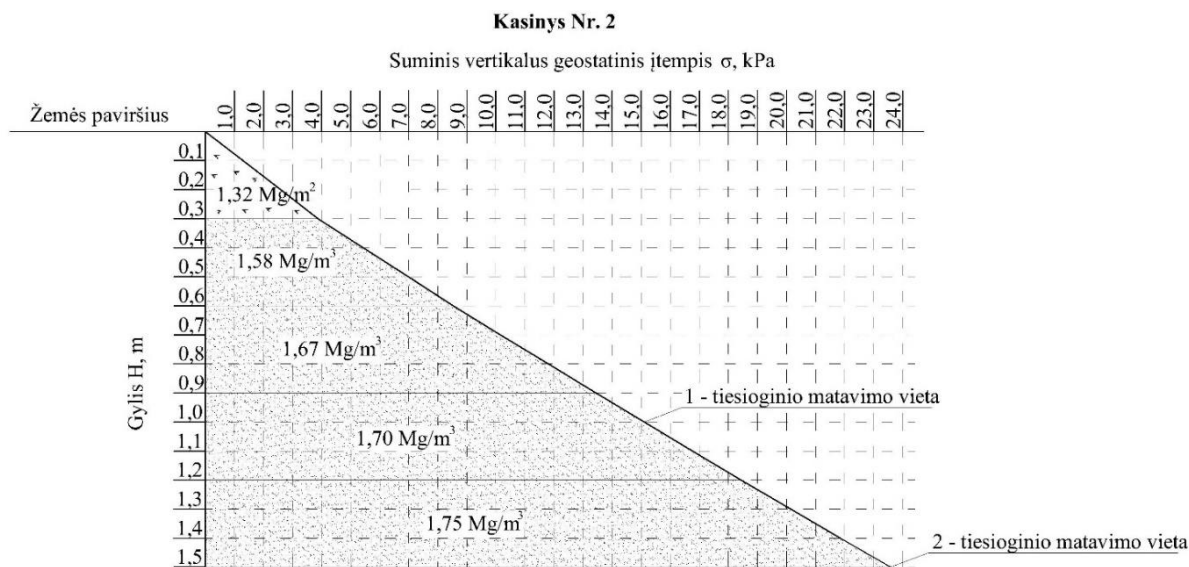
**Kasinyje Nr.2** pagal 3 skyriuje aprašytą metodiką nustatyti gruntų tankiai (3.8), apskaičiuoti savitieji sunkiai (3.9) ir suminiai vertikalieji įtempiai (3.1). Grunto masyvo suminis vertikalus geostatinis įtempis apskaičiuotas pagal 1.9 formulę. Gauti skaičiavimų rezultatai pateikti 4.9 lentelėje. Mėlyna spalva pažymėtuose langeliuose suminio vertikalaus geostatinio įtempio reikšmės 1,0 ir 1,5 m gyliuose. Šios reikšmės išskirtos, nes bus lyginamos su tiesioginio bandymo metu išmatuoto suminio vertikalaus geostatinio įtempio reikšmėmis.



4.9 lentelė. Kasinyje Nr.1 apskaičiuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis

Gruntas	Gylis h, m	Tankis $\rho$ , $\text{Mg/m}^3$	Savitasis sunkis $\gamma$ , $\text{kN/m}^3$	Sluoksniu suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma$ , kPa	Suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma$ , kPa
Dirvožemis	0,1	1,32	12,94	1,29	1,29
	0,2	1,32	12,94	1,29	2,59
	0,3	1,32	12,94	1,29	3,88
Smulkusis smėlis	0,4	1,58	15,48	1,55	5,43
	0,5	1,58	15,48	1,55	6,98
	0,6	1,58	15,48	1,55	8,53
	0,7	1,67	16,37	1,64	10,16
	0,8	1,67	16,37	1,64	11,80
	0,9	1,67	16,37	1,64	13,44
	1,0	1,70	16,66	1,67	15,10
	1,1	1,70	16,66	1,67	16,77
	1,2	1,70	16,66	1,67	18,43
	1,3	1,75	17,15	1,72	20,15
	1,4	1,75	17,15	1,72	21,86
	1,5	1,75	17,15	1,72	23,58

Pagal gautus duomenis nubraižomas suminio vertikalaus geostatinio įtempio priklausomybės nuo gylio grafikas (4.6 pav.)



4.6 pav. Apskaičiuoto suminio geostatinio įtempio priklausomybės nuo gylio grafikas

Grafike (4.6 pav.) ant suminio geostatinio įtempio priklausomybės nuo gylio linijos pažymėti taškai 1 ir 2. Šie pažymėti taškai nurodo, kuriuose gyliuose kasinyje Nr.2 atliktas tiesioginio matavimo bandymas.

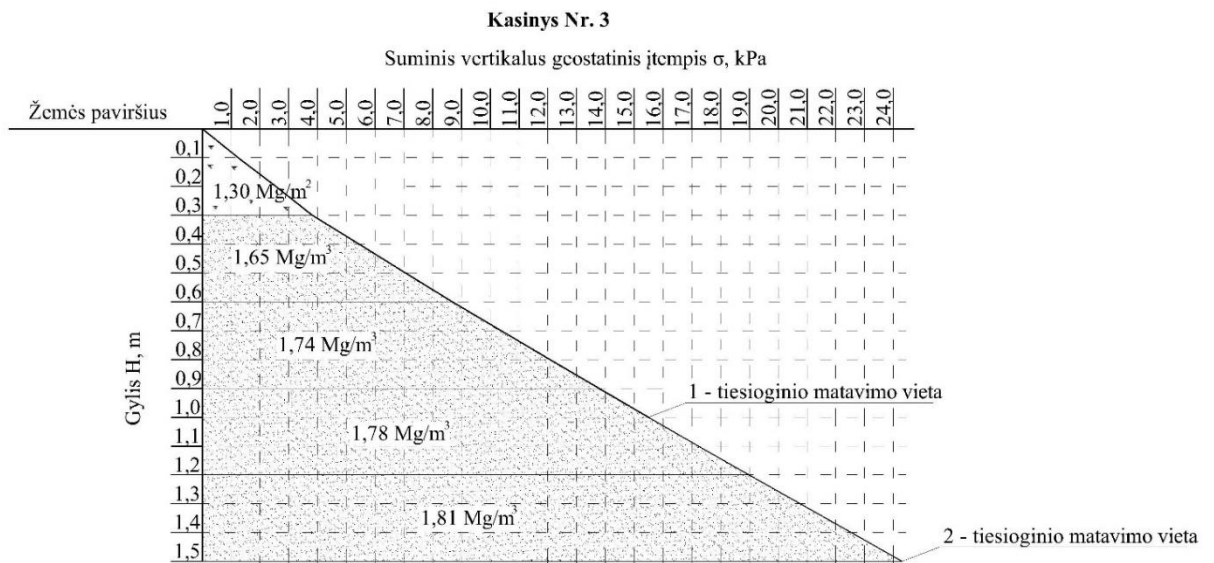
Efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis 1,0 ir 1,5 m gyliuose priimamas lygus suminiam vertikaliajam įtempiui  $\sigma'=\sigma$ , pagal 4.2 skyriuje esančia prielaidą. Gauname kad  $\sigma'$  1,0 m gylyje yra 15,10 kPa, o 1,5 m gylyje yra 23,58 kPa.

**Kasinyje Nr.3** pagal 3 skyriuje aprašytą metodiką nustatyti gruntų tankiai (3.8), apskaičiuoti savitieji sunkiai (3.9) ir suminiai vertikalieji įtempiai (3.1). Grunto masyvo suminis vertikalus geostatinis įtempis apskaičiuotas pagal 1.9 formulę. Gauti skaičiavimų rezultatai pateikti 4.9 lentelėje. Mėlyna spalva pažymėtuose langeliuose suminio vertikalaus geostatinio įtempio reikšmės 1,0 ir 1,5 m gyliuose. Šios reikšmės išskirtos, nes bus lyginamos su tiesioginio bandymo metu išmatuoto suminio vertikalaus geostatinio įtempio reikšmėmis.

4.10 lentelė. Kasinyje Nr.1 apskaičiuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis

Gruntas	Gylis h, m	Tankis $\rho$ , Mg/m <sup>3</sup>	Savitasis sunkis $\gamma$ , kN/m <sup>3</sup>	Sluoksniu suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma$ , kPa	Suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma$ , kPa
Dirvožemis	0,1	1,30	12,74	1,27	1,27
	0,2	1,30	12,74	1,27	2,55
	0,3	1,30	12,74	1,27	3,82
Smulkusis smėlis	0,4	1,65	16,17	1,62	5,44
	0,5	1,65	16,17	1,62	7,06
	0,6	1,65	16,17	1,62	8,67
	0,7	1,74	17,05	1,71	10,38
	0,8	1,74	17,05	1,71	12,08
	0,9	1,74	17,05	1,71	13,79
	1,0	1,78	17,05	1,71	15,49
	1,1	1,78	17,44	1,74	17,24
	1,2	1,78	17,44	1,74	18,98
	1,3	1,81	17,74	1,77	20,76
	1,4	1,81	17,74	1,77	22,53
	1,5	1,81	17,74	1,77	24,30

Pagal gautus duomenis nubraižomas suminio vertikalaus geostatinio įtempio priklausomybės nuo gylio grafikas (4.7 pav.)



4.7 pav. Apskaičiuoto suminio vertikalus geostatinio įtempio priklausomybės nuo gylio grafikas

Grafike (4.7 pav.) ant suminio vertikalus geostatinio įtempio priklausomybės nuo gylio linijos pažymėti taškai 1 ir 2. Šie pažymėti taškai nurodo, kuriuose gyliuose kasinyje Nr.3 atliktas tiesioginio matavimo bandymas.

Efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis 1,0 ir 1,5 m gyliuose priimamas lygus suminiam vertikaliajam įtempiui  $\sigma' = \sigma$ , pagal 4.2 skyriuje esančia prielaidą. Gauname kad  $\sigma'$  1,0 m gylyje yra 15,49 kPa, o 1,5 m gylyje yra 24,30 kPa.

**Kasinyje Nr.4** pagal 3. skyriuje aprašytą metodiką nustatyti gruntų tankiai (3.8), apskaičiuoti savitieji sunkiai (3.9) ir suminiai vertikalieji įtempiai (3.1). Grunto masyvo suminis vertikalus geostatinis įtempis apskaičiuotas pagal 1.9 formulę. Gauti skaičiavimų rezultatai pateikti 4.11 lentelėje. Mėlyna spalva pažymėtuose langeliuose suminio vertikalus geostatinio įtempio reikšmės 1,0 ir 1,5 m gyliuose. Šios reikšmės išskirtos, nes bus lyginamos su tiesioginio bandymo metu išmatuoto suminio vertikalus geostatinio įtempio reikšmėmis.

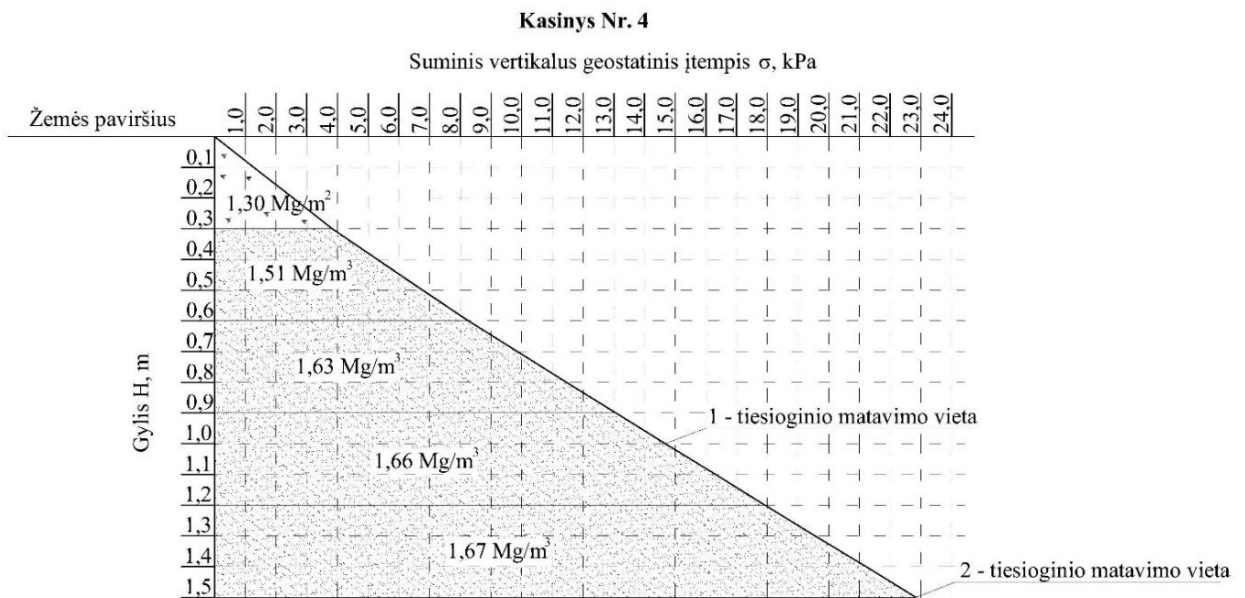
4.11 lentelė. Kasinyje Nr.1 apskaičiuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis

Gruntas	Gylis h, m	Tankis $\rho$ , $\text{Mg/m}^3$	Savitasis sunkis $\gamma$ , $\text{kN/m}^3$	Sluoksniu suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma$ , kPa	Suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma$ , kPa
Dirvožemis	0,1	1,30	12,74	1,27	1,27
	0,2	1,30	12,74	1,27	2,55

4.11 lentelės tęsinys

Dirvožemis	0,3	1,30	12,74	1,27	3,82
Smulkusis smėlis	0,4	1,51	14,80	1,48	5,30
	0,5	1,51	14,80	1,48	6,78
	0,6	1,51	14,80	1,48	8,26
	0,7	1,63	15,97	1,60	9,86
	0,8	1,63	15,97	1,60	11,46
	0,9	1,63	15,97	1,60	13,05
	1,0	1,66	16,27	1,63	14,68
	1,1	1,66	16,27	1,63	16,31
	1,2	1,66	16,27	1,63	17,93
	1,3	1,67	16,37	1,64	19,57
	1,4	1,67	16,37	1,64	21,21
	1,5	1,67	16,37	1,64	22,84

Pagal gautus duomenis nubraižomas suminio vertikalaus geostatinio įtempio priklausomybės nuo gylio grafikas (4.8 pav.)



4.8 pav. Apskaičiuoto suminio vertikalaus geostatinio įtempio priklausomybės nuo gylio grafikas

Grafike (4.8 pav.) ant suminio vertikalaus geostatinio įtempio priklausomybės nuo gylio linijos pažymėti taškai 1 ir 2. Šie pažymėti taškai nurodo, kuriuose gyliuose kasinyje Nr.4 atliktas tiesioginio matavimo bandymas.

Efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis 1,0 ir 1,5 m gyliuose priimamas lygus suminiam vertikaliam įtempimui  $\sigma' = \sigma$ , pagal 4.2 skyriuje esančia prielaidą. Gauname kad  $\sigma'$  1,0 m gylyje yra 14,68 kPa, o 1,5 m gylyje yra 22,84kPa.

### 4.3. Suminio vertikalaus geostatinio įtempio tiesioginio matavimo rezultatai

Kasinyje Nr. 1; 1,0 ir 1,5 m gyliuose nuo žemės paviršiaus atlikta po 4 tiesioginio matavimo bandymus. Išviso atlikti 8 matavimai. Gauti tiesioginio matavimo rezultatai pateikti 2 lentelėje.

4.12 lentelė. Kasinyje Nr.1 išmatuoti suminiai vertikalieji geostatiniai įtempiai

Kasinyys Nr. 1					
1,0 m gylis			1,5 m gylis		
Prietaiso parodymai	Grunto slėgis, atm	Suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^*$ , kPa	Prietaiso parodymai	Grunto slėgis, atm	Suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^*$ , kPa
1315	0,132	13,324	2112	0,211	21,399
1298	0,130	13,151	2125	0,213	21,531
1459	0,146	14,783	2189	0,219	22,179
1340	0,134	13,577	2204	0,220	22,331

Kasinyje Nr. 2; 1,0 ir 1,5 m gyliuose nuo žemės paviršiaus atlikta po 4 tiesioginio matavimo bandymus. Išviso atlikti 8 matavimai. Gauti tiesioginio matavimo rezultatai pateikti 2 lentelėje.

4.13 lentelė. Kasinyje Nr.2 išmatuoti suminiai vertikalieji geostatiniai įtempiai

Kasinyys Nr. 2					
1,0 m gylis			1,5 m gylis		
Prietaiso parodymai	Grunto slėgis, atm	Suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^*$ , kPa	Prietaiso parodymai	Grunto slėgis, atm	Suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^*$ , kPa
1289	0,129	13,06	2143	0,214	21,71
1254	0,125	12,71	2451	0,245	24,83
1322	0,132	13,39	2201	0,220	22,30
1308	0,131	13,25	2178	0,218	22,07

Kasinyje Nr.3; 1,0 ir 1,5 m gyliuose nuo žemės paviršiaus atlikta po 4 tiesioginio matavimo bandymus. Išviso atlikti 8 matavimai. Gauti tiesioginio matavimo rezultatai pateikti 2 lentelėje.

4.14 lentelė. Kasinyje Nr.3 išmatuoti suminiai vertikalieji geostatiniai įtempiai

Kasinyys Nr. 3					
1,0 m gylis			1,5 m gylis		
Prietaiso parodymai	Grunto slėgis, atm	Suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^*$ , kPa	Prietaiso parodymai	Grunto slėgis, atm	Suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^*$ , kPa
1688	0,169	17,10	2289	0,229	23,19
1356	0,136	13,74	2314	0,231	23,45
1372	0,137	13,90	2253	0,225	22,83
1405	0,141	14,24	2301	0,230	23,31

Kasinyje Nr.4; 1,0 m gylyje atlikti 3 tiesioginio matavimo bandymai, o 1,5 m gylyje atlikti 2 tiesioginio matavimo bandymus. Išviso atlikti 5 matavimai. Gauti tiesioginio matavimo rezultatai pateikti 2 lentelėje.

4.14 lentelė. Kasinyje Nr.4 išmatuoti suminiai vertikalieji geostatiniai įtempiai

Kasinyys Nr.4					
1,0 m gylis			1,5 m gylis		
Prietaiso parodymai	Grunto slėgis, atm	Suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^*$ , kPa	Prietaiso parodymai	Grunto slėgis, atm	Suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^*$ , kPa
1264	0,126	12,81	2177	0,218	22,06
1199	0,120	12,15	2067	0,207	20,94
1252	0,125	12,69			

Lentelėse pažymėtas  $\sigma^*$  – tai suminis vertikalus geostatinis įtempis gautas tiesioginio matavimo bandymu.

#### 4.4. Efektyviojo vertikalus įtempio skaičiavimo rezultatai

Remiantis metodika apskaičiuojamas smėlio tūrinis drėgnis, pagal kurį iš grafiko (1.11) nustatomas matricos įsiurbimo slėgis. Efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis apskaičiuojamas nuo tiesioginiu matavimu išmatuoto suminio geostatinio įtempio remiantis 3 skyriuje nurodyta metodika pagal 3.3 formulę, gauti rezultatai pateikti lentelėje 4.15.

4.15 lentelė. Kasiniuose apskaičiuoti efektyvieji vertikalūs geostatiniai įtempiai

Kasiny Nr.1				Kasiny Nr.2			
1,0 m gylis							
Suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^*$ , kPa	Tūrinis drėgnis, $\Theta_w$ , vnt.d.	Matricos įsiurbimo slėgis, $(u_a - u_w)$ , kPa	Efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^{*'}$ , kPa	Suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^*$ , kPa	Tūrinis drėgnis, $\Theta_w$ , vnt.d.	Matricos įsiurbimo slėgis, $(u_a - u_w)$ , kPa	Efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^{*'}$ , kPa
13,32	0,134	7,10	16,47	13,06	0,152	6,70	15,97
13,15			16,30	12,71			15,62
14,78			17,93	13,39			16,31
13,58			16,72	13,25			16,16
1,5 m gylis							
21,40	0,140	7,00	24,38	13,06	0,159	6,50	24,46
21,53			24,51	12,71			27,58
22,18			25,16	13,39			25,05
22,33			25,31	13,25			24,81

4.15 lentelės tęsinys

Kasiny Nr.1				Kasiny Nr.2			
1,0 m gylis							
Suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^*$ , kPa	Tūrinis drėgnis, $\Theta_w$ , vnt.d.	Matricos įsiurbimo slėgis, $(u_a - u_w)$ , kPa	Efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^{*'}$ , kPa	Suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^*$ , kPa	Tūrinis drėgnis, $\Theta_w$ , vnt.d.	Matricos įsiurbimo slėgis, $(u_a - u_w)$ , kPa	Efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^{*'}$ , kPa
17,10	0,138	7,10	20,05	12,81	0,130	7,30	16,05
13,74			16,68	12,15			15,40
13,90			16,84	12,69			15,93
14,24			17,18				
1,5 m gylis							
23,19	0,144	6,90	25,95	22,06	0,135	7,20	25,20
23,45			26,21	20,94			24,08
22,83			25,59				
23,31			26,08				

Apskaičiuotas smėlio tūrinis drėgnis ( $\Theta_w$ ) pagal 3.5 formulę, kinta nuo 0,130 iki 0,159, todėl pagal 1.11 pav. esantį grafiką galime daryti prielaidą kad susidaro matricos įsiurbimo slėgis ( $u_a - u_w$ ), dėl to didėja efektyvieji įtempiai grunte. Apskaičiuoti efektyvieji vertikalūs geostatiniai ( $\sigma^{*'}$ ) 1,0 m gilyje kinta nuo 15,40 iki 17,93 kPa, o 2,0 m gilyje kinta nuo 24,08 iki 27,58 kPa.

## 4.5. Gautų matavimo ir skaičiavimo rezultatų palyginimas

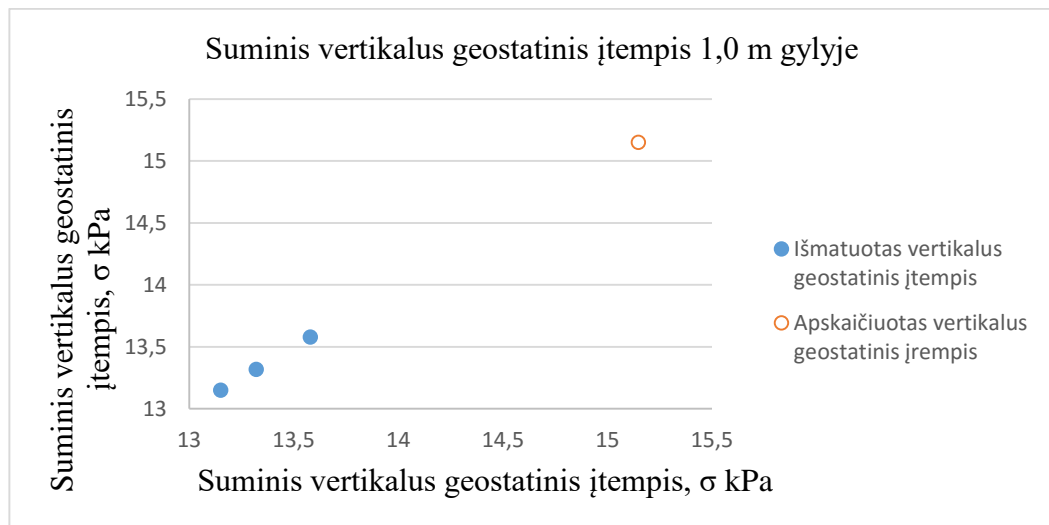
Apskaičiavus ir tiesiogiai išmatavus suminį vertikalų geostatinį įtempį atliekama gautų reikšmių lyginamoji analizė. Analizei atlikti imamos suminių vertikalų įtempių reikšmės išmatuotos ir apskaičiuotos 1,0 ir 1,5 m gyliuose.

Lentelėje 4.16 pateikti galutiniai skaičiavimų ir matavimo kasinyje Nr.1 rezultatai.

4.16 lentelė. Išmatuoto ir apskaičiuoto suminio vertikalaus geostatinio įtempio palyginimas

Kasinyš Nr. 1		
Apskaičiuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma$ , kPa	Išmatuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^*$ , kPa	Skirtumas, %
1,0 m gylis		
15,15	13,32	12,06
15,15	13,15	13,20
15,15	14,78	2,43
15,15	13,58	10,39
1,5 m gylis		
23,68	21,40	9,62
23,68	21,53	9,06
23,68	22,18	6,33
23,68	22,33	5,68

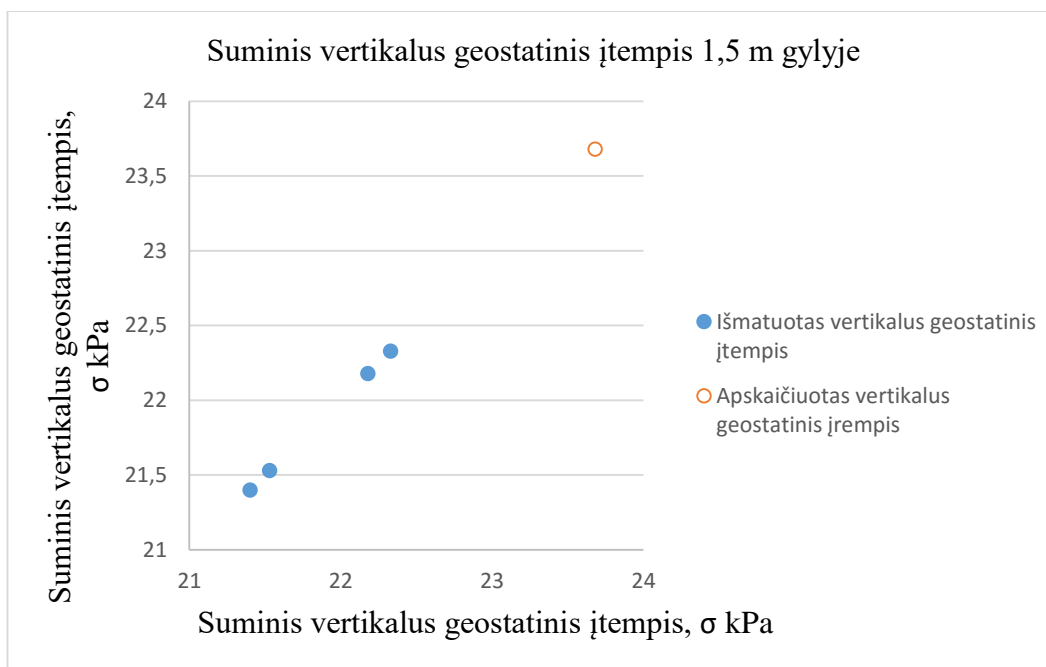
Apskaičiuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis ( $\sigma$ ) 1,0 m gylyje yra lygus 15,15 kPa, o išmatuotas tiesioginiu matavimu nuo 13,15 iki 13,58 kPa (4.9 pav.), vidurkis 13,35 kPa. Apskaičiuota reikšmė didesnė už išmatuotą reikšmę 10,39–13,20%, vidurkis 11,88%.



4.9 pav. Kasinio Nr.1 apskaičiuoto ir išmatuoto suminio vertikalaus geostatinio įtempio 1,0 m gylyje lyginamasis grafikas



Apskaičiuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis  $\sigma$  1,5 m gylyje yra lygus 23,68 kPa, o išmatuotas tiesioginiu matavimu nuo 21,40 iki 22,33 kPa (4.10 pav.), vidurkis 21,86 kPa. Apskaičiuota reikšmė didesnė už išmatuotą reikšmę 5,68–9,62%, vidurkis 7,67%.



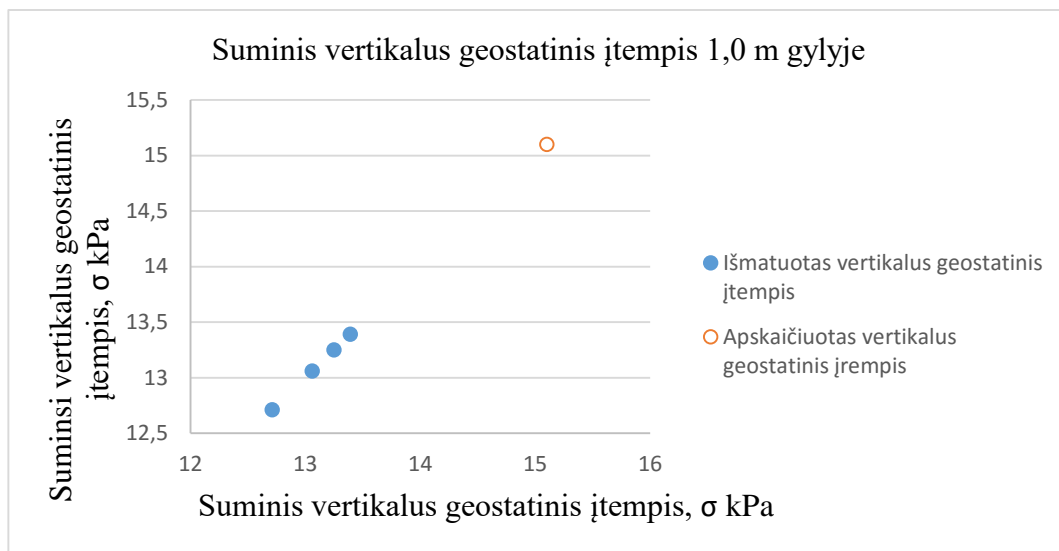
4.10 pav. Kasinio Nr.1 apskaičiuoto ir išmatuoto suminio vertikalaus geostatinio įtempio 1,5 m gylyje lyginamasis grafikas

Lentelėje 4.17 pateikti galutiniai skaičiavimų ir matavimo kasinyje Nr.2 rezultatai.

4.17 lentelė. Išmatuoto ir apskaičiuoto suminio vertikalaus geostatinio įtempio palyginimas

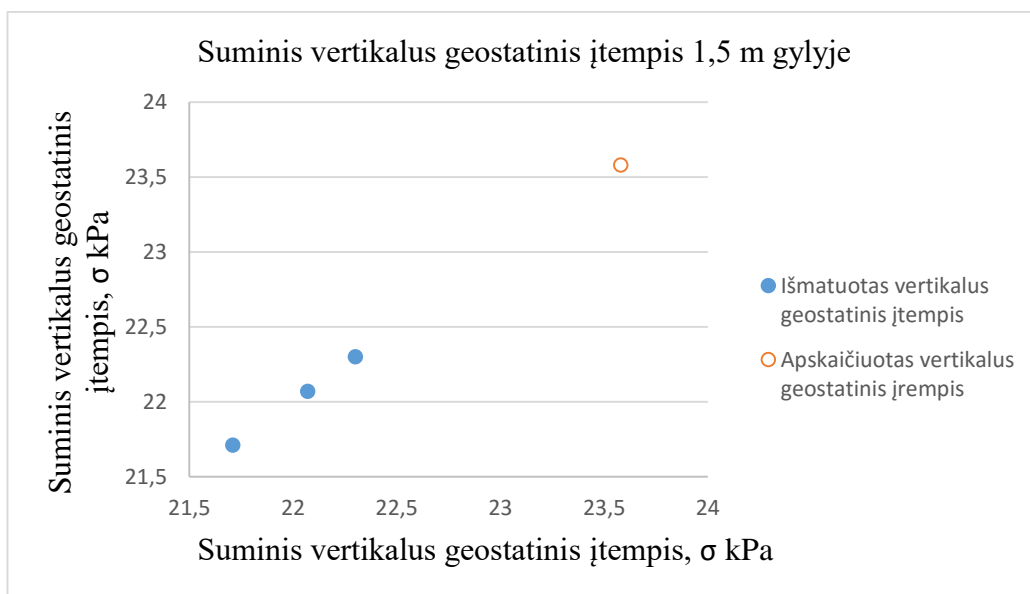
Kasinyys Nr. 2		
Apskaičiuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma$ , kPa	Išmatuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^*$ , kPa	Skirtumas, %
1,0 m gylis		
15,10	13,06	13,52
15,10	12,71	15,87
15,10	13,39	11,31
15,10	13,25	12,24
1,5 m gylis		
23,58	21,71	7,91
23,58	24,83	-5,32
23,58	22,30	5,42
23,58	22,07	6,41

Apskaičiuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis ( $\sigma$ ) 1,0 m gylyje yra lygus 15,10 kPa, o išmatuotas tiesioginiu matavimu kinta nuo 12,71 iki 13,39 kPa (4.11 pav.), vidurkis 13,10 kPa. Apskaičiuota reikšmė didesnė už išmatuotą reikšmę 11,31–15,87%, vidurkis 13,24%.



4.11 pav. Kasinio Nr.2 apskaičiuoto ir išmatuoto suminio vertikalaus geostatinio įtempio 1,0 m gylyje lyginamasis grafikas

Apskaičiuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis ( $\sigma$ ) 1,5 m gylyje yra lygus 23,58 kPa, o išmatuotas tiesioginiu matavimu kinta nuo 21,71 iki 22,30 kPa (2.12 pav.), vidurkis 22,03 kPa. Apskaičiuota reikšmė didesnė už išmatuotą reikšmę 5,42–7,91%, vidurkis 6,58%.



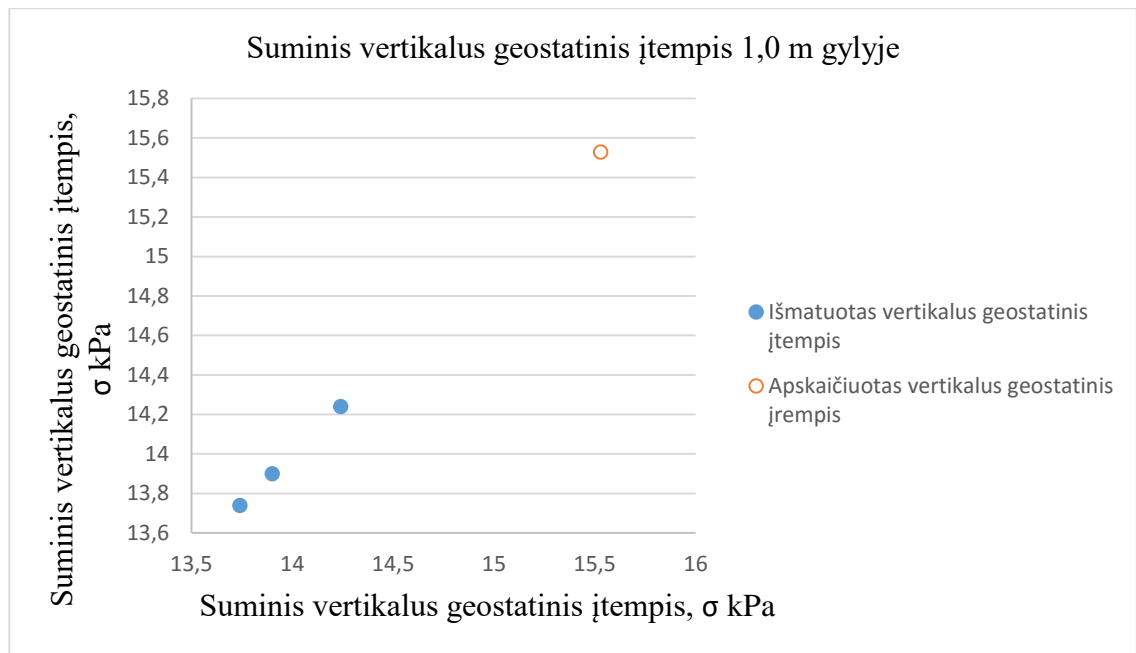
4.12 pav. Kasinio Nr.2 apskaičiuoto ir išmatuoto suminio vertikalaus geostatinio įtempio 1,5 m gylyje lyginamasis grafikas

Lentelėje 4.18 pateikti galutiniai skaičiavimų ir matavimo kasinyje Nr.3 rezultatai.

4.18 lentelė. Išmatuoto ir apskaičiuoto suminio vertikalaus geostatinio įtempio palyginimas

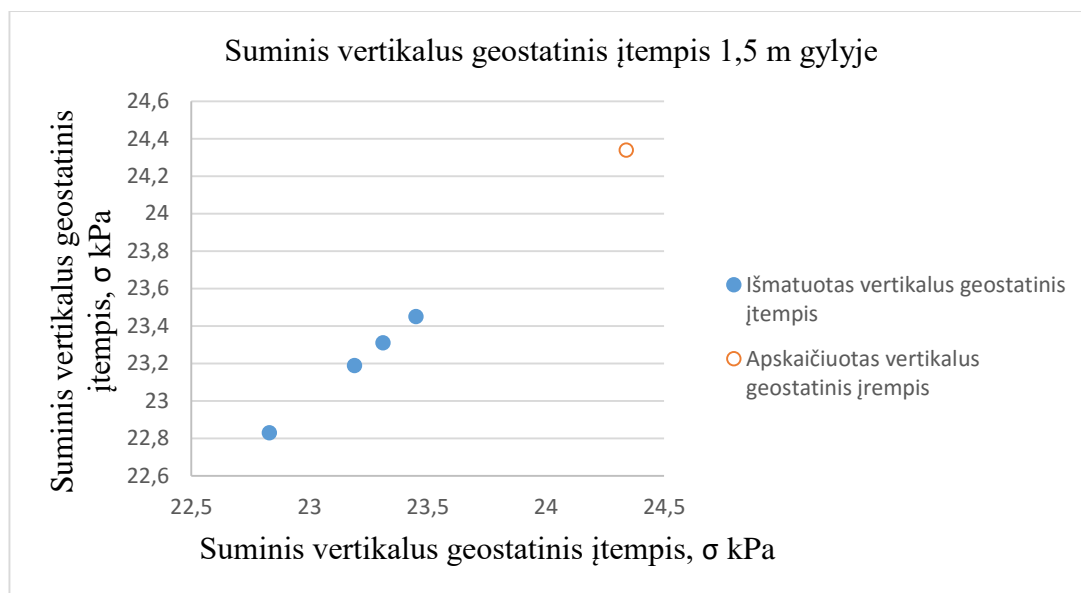
Kasinyje Nr. 3		
Apskaičiuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma$ , kPa	Išmatuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^*$ , kPa	Skirtumas, %
1,0 m gylis		
15,53	17,10	-10,11
15,53	13,74	11,55
15,53	13,90	10,51
15,53	14,24	8,35
1,5 m gylis		
24,34	23,19	4,73
24,34	23,45	3,69
24,34	22,83	6,23
24,34	23,31	4,23

Apskaičiuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis ( $\sigma$ ) 1,0 m gylyje yra lygus 15,53 kPa, o išmatuotas tiesioginiu matavimu kinta nuo 13,74 iki 14,24 kPa (4.13 pav.), vidurkis 13,25 kPa. Apskaičiuota reikšmė didesnė už išmatuotą reikšmę 8,35–11,55%, vidurkis 10,14%.



4.13 pav. Kasinio Nr.3 apskaičiuoto ir išmatuoto suminio vertikalaus geostatinio įtempio 1,0 m gylyje lyginamasis grafikas

Apskaičiuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis ( $\sigma$ ) 1,5 m gylyje yra lygus 24,34 kPa, o išmatuotas tiesioginiu matavimu kinta nuo 22,83 iki 32,45 kPa (4.14 pav.), vidurkis 23,20 kPa. Apskaičiuota reikšmė didesnė už išmatuotą reikšmę 3,69–6,23%, vidurkis 4,72%.



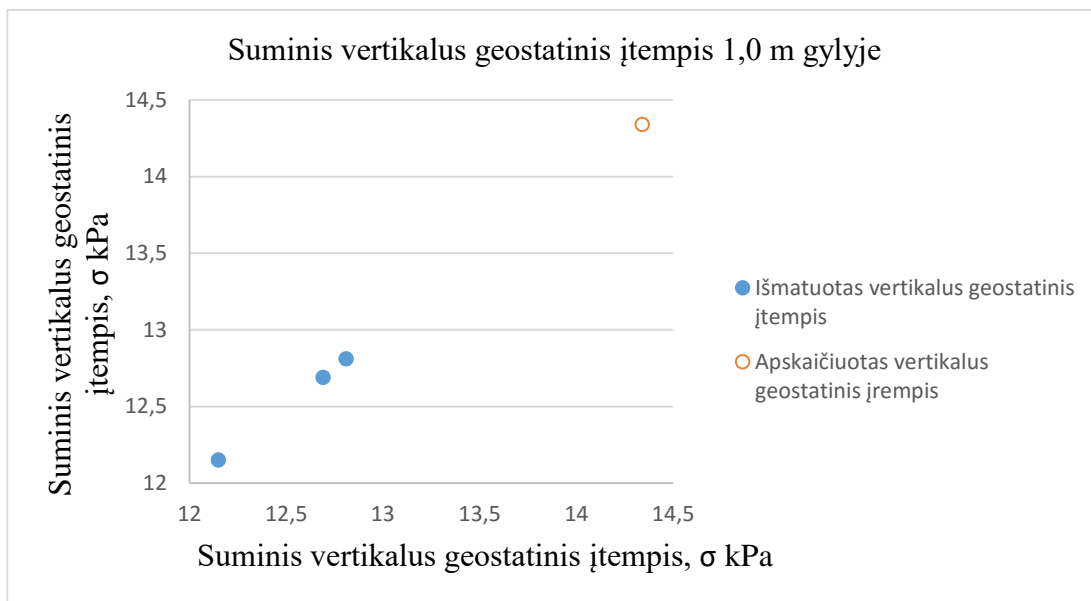
4.14 pav. Kasinio Nr.3 apskaičiuoto ir išmatuoto suminio vertikalaus geostatinio įtempio 1,5 m gylyje lyginamasis grafikas

Lentelėje (4.19) pateikti galutiniai skaičiavimų ir matavimo kasinyje Nr.4 rezultatai.

4.19 lentelė. Išmatuoto ir apskaičiuoto suminio vertikalaus geostatinio įtempio palyginimas

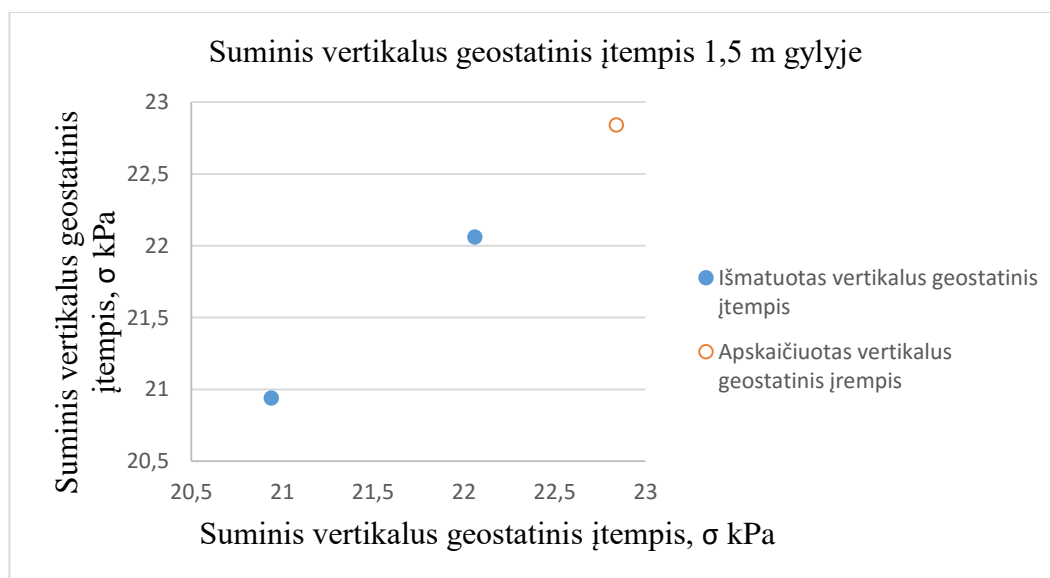
Kasinyje Nr. 4		
Apskaičiuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma$ , kPa	Išmatuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^*$ , kPa	Skirtumas, %
1,0 m gylis		
14,68	12,81	12,76
14,68	12,15	17,25
14,68	12,69	13,59
1,5 m gylis		
24,34	22,06	9,39
24,34	20,94	13,97

Apskaičiuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis ( $\sigma$ ) 1,0 m gylyje yra lygus 14,68 kPa, o išmatuotas tiesioginiu matavimu kinta nuo 12,15 iki 12,81 kPa (4.15 pav.), vidurkis 12,55 kPa. Apskaičiuota reikšmė didesnė už išmatuotą reikšmę 12,76–17,25%, vidurkis 14,53%.



4.15 pav. Kasinio Nr.4 apskaičiuoto ir išmatuoto suminio vertikalaus geostatinio įtempio 1,0 m gylyje lyginamasis grafikas

Apskaičiuotas suminis vertikalus geostatinis įtempis ( $\sigma$ ) 1,5 m gylyje yra lygus 24,34 kPa, o išmatuotas tiesioginiu matavimu kinta nuo 20,92 iki 22,06 kPa (4.16 pav.), vidurkis 21,50 kPa. Apskaičiuota reikšmė didesnė už išmatuotą reikšmę 9,39–13,97%, vidurkis 11,68%.



4.16 pav. Kasinio Nr.4 apskaičiuoto ir išmatuoto suminio vertikalaus geostatinio įtempio 1,5 m gylyje lyginamasis grafikas

Galutiniai efektyviųjų vertikalųjų geostatinųjų įtempių skaičiavimo rezultatai 4.20 lentelėje.

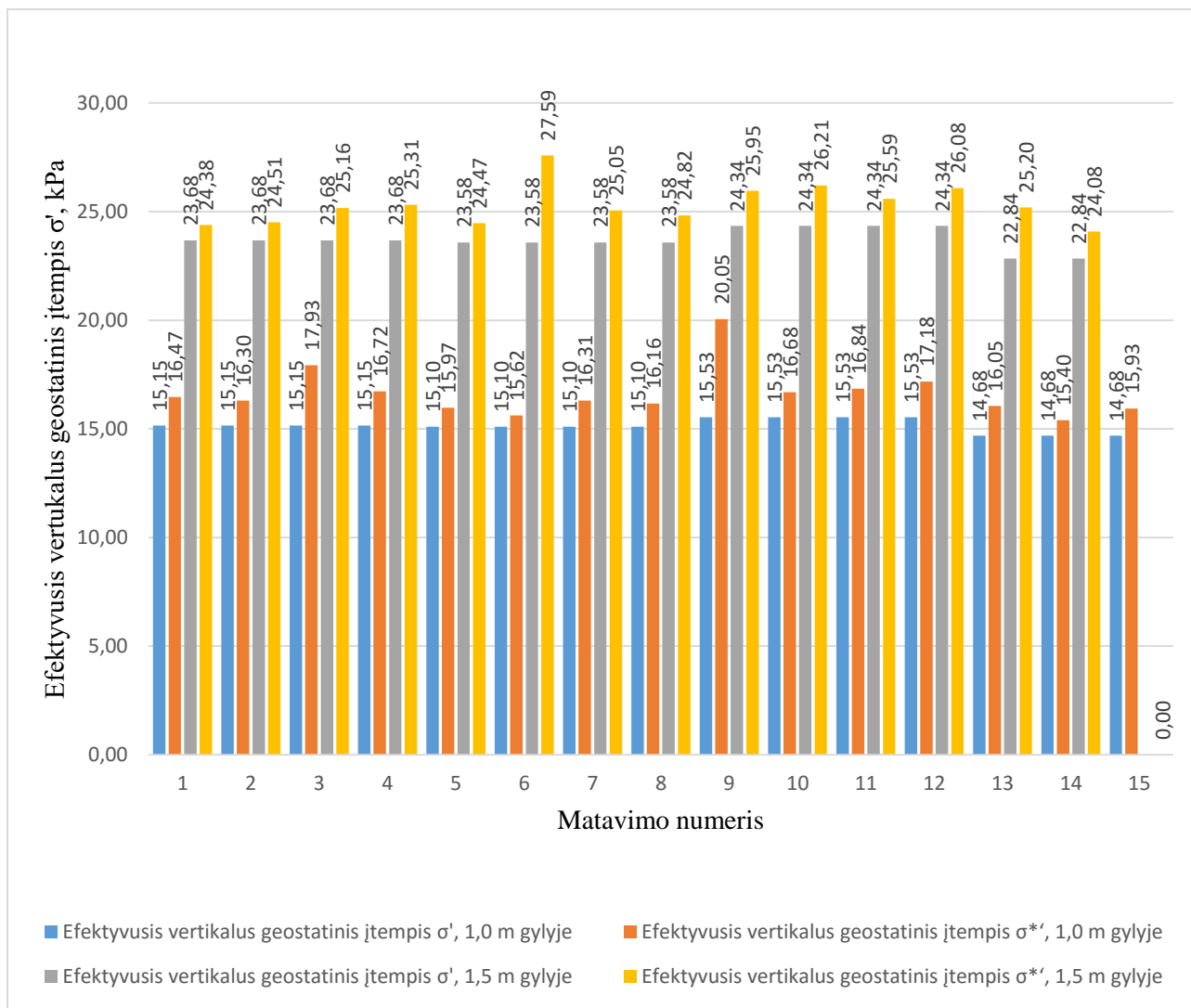
4.20 lentelė. Efektyvieji vertikalūs geostatiniai įtempiai kasiniuose

Efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma = \sigma'$ , kPa	Efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^{*'}$ , kPa	Skirtumas $\sigma' - \sigma^{*'}$ , kPa	Skirtumas, %	Efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma = \sigma'$ , kPa	Efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis $\sigma^{*'}$ , kPa	Skirtumas $\sigma' - \sigma^{*'}$ , kPa	Skirtumas, %
1,0 m gylis				1,5 m gylis			
15,15	16,47	-1,32	8,71	23,68	24,38	-0,70	2,98
	16,30	-1,15	7,57		24,51	-0,84	3,53
	17,93	-2,78	18,34		25,16	-1,48	6,27
	16,72	-1,57	10,38		25,31	-1,64	6,91
15,10	15,97	-0,87	5,76	23,58	24,47	-0,89	3,76
	15,62	-0,52	3,41		27,59	-4,01	16,99
	16,31	-1,20	7,98		25,05	-1,47	6,25
	16,16	-1,06	7,04		24,82	-1,24	5,26
15,53	20,05	-4,51	29,05	24,34	25,95	-1,61	6,62
	16,68	-1,15	7,40		26,21	-1,86	7,66
	16,84	-1,31	8,44		25,59	-1,25	5,12
	17,18	-1,65	10,59		26,08	-1,73	7,12
14,68	16,05	-1,37	9,36	22,84	25,20	-2,35	10,30
	15,40	-0,72	4,87		24,08	-1,24	5,42
	15,93	-1,25	8,53		-	-	-
Vidurkis	16,28	-1,16	7,70	-	25,23	-1,30	5,41

Bandymų rezultatų 1,0 m gylyje imties vidutinis kvadratinis nuokrypis ( $s$ ) yra 6,07, variacijos koeficientas 0,62, 1,5 m gylyje imties vidutinis kvadratinis nuokrypis ( $s$ ) yra 6,73, variacijos koeficientas 0,50, todėl statistiškai apdorojus duomenis 4.20 lentelėje raudonai pažymėtos reikšmės yra netraukiamos į rezultatų analizę. Šios reikšmės gautos matavimu ir skaičiavimų metu labai skiriasi nuo kitų rezultatų. Šis skirtumas galėjo atsirasti dėl netinkamai bandymo metu tiesiogiai pamatuoto suminio vertikalaus geostatinio įtempio kasinyje. Kadangi šios reikšmės yra didesnės už vidutines, tai galbūt bandymo atlikimo metu matavimo prietaisas neišlaikė horizontalios padėties ir membrana gavo didesnę grunto spaudimą.

Pagal lentelėje 4.20 pateiktus skaičiavimo rezultatus apskaičiuotas geostatinis įtempis nuo tiesiogiai išmatuoto suminio geostatinio įtempio ( $\sigma^{*'}$ ) kasiniuose 1,0 m gylyje yra 3,41–10,59%, vidurkis 7,70% didesnis už apskaičiuota efektyvųjų vertikalų geostatinį įtempį ( $\sigma'$ ), o 1,5 m gylyje 2,98–7,66%, vidurkis 5,41%.

Visų efektyviųjų vertikalųjų geostatinųjų įtempijų reikšmės ir jų palyginimai pavaizduoti 4.17 paveiksle.



4.17 pav. Efektyviųjų vertikalųjų geostatinių įtempių lyginamasis grafikas

Grafike (4.17 pav.) numeriais pažymėti matavimai kasiniuose. Numeriai 1-4 yra matavimai pirmajame kasinyje, 5–8 antrajame, 9–12 trečiajame ir 13–15 ketvirtajame. Iš grafiko galime matyti kad 1,0 ir 1,5 m gyliuose visos efektyviojo vertikalaus geostatinio įtempio reikšmės  $\sigma^{*c}$  yra didesnės už  $\sigma^c$ . Taip pat matome, kad efektyvieji vertikalūs įtempiai 1,5 m gylyje yra didesni, už 1,0 m gylyje esančius efektyviuosius įtempius, tačiau skirtumas tarp  $\sigma^{*c}$  ir  $\sigma^c$  skirtinguose gyliuose išlieka labai panašus. Šis skirtumas 1,0 m gylyje vidutiniškai yra 1,16 kPa, o 1,5 m gylyje–1,3 kPa.

## 5. Duomenų apibendrinimas

Atlikus bandymus ir matavimus, gauta kad 1,0 m gylyje apskaičiuotas efektyvusis geostatinis įtempis pagal Bishop'o teoriją nuo tiesioginiu matavimu išmatuotos reikšmės didesnis už apskaičiuota pagal Terzaghi efektyviųjų įtempių teorija mažai drėgniems gruntams, nuo 3,41 iki 10,59%, vidurkis 7,70%. 1,5 m gylyje – didesnis nuo 2,98 iki 7,66%, vidurkis 5,41%.

Praktikoje mažai drėgnam arba aeracijos zonoje esančiam grunto efektyviųjų įtempių vertinimui taip pat naudojama klasikinė Terzaghi efektyviųjų įtempių teorija. Pagal gautus skirtumus matome, kad pagal šią teoriją gauti efektyvieji įtempiai gaunami mažesni nuo tiesiogiai išmatuoto. Remiantis skirtumu tarp dviejų skirtingų metodų gautais rezultatais, galima daryti prielaidą, kad aeracijos zonoje esančio smėlio suminis vertikalus geostatinis įtempis nėra lygus efektyviam vertikaliam geostatiniam įtempiui ( $\sigma \neq \sigma'$ ). Skirtumas atsiranda dėl to, kad mažai drėgniems ar aeracijos zonoje esantiems gruntams nėra įvertinama esanti drėgmės įtaka. Šio darbo bandymo metu nagrinėtame natūralios sandaros ir aeracijos zonoje esančio smėlio drėgmė kinta 8–9% intervale. Dėl esančio vandens kiekio smėlyje susidaro porinis slėgis, kuris įgauna neigiamą reikšmę. Porinis slėgis neigiamas, nes vanduo grunte traukia smėlio daleles vieną prie kitos. Dalelių traukimas dėl vandens vadinamas matricos įsiurbimo slėgis, kuris didina efektyviusius įtempius grunte. Aeracijos zonoje esančiame smėlyje matricos įsiurbimo slėgis būna tada, kai tūrinis drėgnis kinta nuo 5,0 iki 30,0%, poringumas 30–40% intervale. Tirtame smėlyje tūrinis drėgnis kinta nuo 13,0 iki 14,4%, todėl yra matricos įsiurbimo slėgis ir efektyvieji vertikalieji įtempiai didėja.

Apibendrinus gautus rezultatus, aeracijos zonoje skaičiuojant efektyvų vertikalų įtempį reikia įvertinti smėlio matricos įsiurbimo slėgį, dėl kurio padidėja efektyvieji įtempiai grunte. Tiksliam matricos įsiurbimo slėgio nustatymui reikia atlikti grunto kietųjų dalelių tankio, gamtinių drėgnio ir tankio nustatymus bei išmatuoti porinį slėgį.



## Išvados

1. Praktiniuose uždaviniuose gruntų masyvų geostatiniai įtempiai vertinami naudojantis Terzaghi efektyviųjų įtempių teorijos sprendiniais. Tiesioginiai jų matavimai atliekami palyginus retai. Dažniau matuojamas papildomas įtempis perduodamas į pagrindą po pastatų pamatais ar sampylų padu.
2. Tiriamo ploto gruntai sudaryti iš dirvožemio (pdIV), technogeninio grunto (tIV) ir aliuvinės kilmės smulkiojo smėlio (aIIIb1).
3. Pasirinkta įranga, bandymų bei skaičiavimo metodika leido tinkamai atlikti smėlio vertikalų geostatinio įtempio tiesioginio matavimo bandymą.
4. Kasiniuose apskaičiuotas suminis geostatinis įtempis ( $\sigma$ ) 1,0 m gylyje yra 8,4–13,6%, vidurkis – 11,8%, didesnis už tiesiogiai išmatuotą ( $\sigma^*$ ), o 1,5 m gylyje šis skirtumas buvo gautas 4,2–9,6%, su 6,8% vidurkiu.
5. Kasiniuose apskaičiuotas efektyvusis vertikalusis geostatinis įtempis ( $\sigma'$ ) 1,0 m gylyje yra 3,4–10,6%, vidurkis 7,7% mažesnis už apskaičiuotą iš tiesiogiai išmatuoto suminio vertikalų geostatinio įtempio ( $\sigma^{*'}), o 1,5 m gylyje šis skirtumas buvo gautas 2,9–7,7%, su 5,4% vidurkiu.$
6. Apskaičiuotas efektyvusis vertikalus geostatinis įtempis  $\sigma'$  yra mažesnis už  $\sigma^{*'}), nes neįvertinama vandens įtaka smėlyje. Aeracijos zonoje esančiame grunte, dėl esančio vandens susidaro smėlio matricos įsiurbimo slėgis, dėl kurio smėlio dalelės yra traukiamos viena prie kitos, taip didėja efektyvieji įtempiai grunte.$
7. Skaičiuojant efektyvius vertikalus geostatinius įtempius aeracijos zonoje esančiuose gruntuose, reikia įvertinti grunto matricos įsiurbimo slėgį, kuris priklauso nuo grunto drėgnio, poringumo bei soties vandeniu laipsnio, bei atlikti porinio slėgio matavimo bandymus.

## Literatūra

- Aitchison G.D. 1961. Relationships of moisture stress and effective stress function in unsaturated soils. Pore pressure and suction in soil. Butterworth, London. Pp. 47–52.
- Bishop A.W. 1960. The principle of effective stress. Norwegian geotechnical institute, vol. 32.
- Fredlund D.G, Rahardjo H. 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley and Sons, Inc.
- Hannah R.L, Reed S.E. 1992. Strain gage users handbook. Lockheed Aeronautical Systems Company, Kelly Johnson Research and development center, Valencia, California, USA.
- Jennings J.E.B. 1961. A revised effective stress law for use in the prediction of the behavior of unsaturated soils. Pore pressure and suction in soils. Butterworth, London, pp 36-30.
- Liakopoulos A. 1965. Retention and distribution of moisture in soils after infiltration has ceased. International association of scientific hydrogeology. Bulletin, pp. 58-69
- Lutenegger, A.J. 2013. Field Response of Push-In Earth Pressure Cells for Instrumentation and Site Characterization of Soils. Geotechnical Engineering Journal of the Southeast Asian Geotechnical Society, Vol. 43, No. 4, pp. 24-33.
- Prušinskienė S. 2012. Smėlio gruntų ypatumai ir jų tyrimo metodai. Vilnius: technika.
- Terzaghi K. 1925. *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*. Franz Deuticke, Leipzig-Vienna.
- Vable M. 2002. Mechanic of material, second edition. Michigan technological university, Michigan, USA.

### Standartai:

- Lietuvos standartas LST EN ISO 14688 – 1:2007. Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Gruntų atpažintis ir klasifikavimas. 1 dalis. Atpažintis ir aprašymas. *Lietuvos standartizacijos departamentas*. 2007.
- Lietuvos standartas LST EN ISO 14688 – 2:2007. Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Gruntų atpažintis ir klasifikavimas. 1 dalis. Atpažintis ir klasifikavimo principai. *Lietuvos standartizacijos departamentas*. 2007.

## Study of Vertical Geostatic Pressure in Sand

### Summary

Earth pressure is one of the parameter which are important in engineering geology and construction. It shows how strongly soil affects engineering structures. There are two main estimation methodology, it would be calculation from known soil parameters and direct measurement. This work is intendent to compare those two methodologies.

In this work main tasks are:

- By measured sand parameters calculate earth pressure at selected points
- Direct measure earth pressure at selected points
- Compare results

In order to achieve those tasks was:

- Provided an appropriate testing and calculating methodology
- Using testing methodology perform earth pressure direct measurement and calculation
- Analyze and present experimental results
- Compare directly measured and calculated earth pressure values

The main conclusions would be:

1. Directly measured vertical earth pressure in vadose zone sand is lower than calculated from soil parameters by 8,4–13,5% at 1 meter depth and 3,7–9,6% at 1,5 meter depth.
2. Directly measured effective earth pressure in vadose zone sand is higher than calculated by 3,4–10,6% at 1 meter depth and 3,0–7,7 at 1,5 meter depth.
3. Those differences shows that in vadose zone sands have matric suction, which attaches sand particles to each other. Attached particles increases strains in soil, so effective vertical earth pressure increases.