



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

**Automobilių kelių žemės sankasos įrengimo technologijų
tyrimas ir daugiakriteris vertinimas**
Baigiamasis magistro studijų projektas

Lukas Stirbys
Projekto autorius

Lekt. dr. Donatas Aviža
Vadovas

Panevėžys, 2023



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Automobilių kelių žemės sankasos įrengimo technologijų tyrimas ir daugiakriteris vertinimas

Baigiamasis magistro studijų projektas
Statybos valdymas (6211EX007)

Lukas Stirbys
Projekto autorius

Lekt. dr. Donatas Aviža
Vadovas

Lekt. Jovita Kaupienė
Konsultantė

Recenzentas / Recenzentė

Panevėžys, 2023



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Lukas Stirbys

Automobilių kelių žemės sankasos įrengimo technologijų tyrimas ir daugiakriteris vertinimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdamas kitų asmenų autorius ar kitų teisių, laikydamasis Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs;
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalintas iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Lukas Stirbys

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

TVIRTINU
TVKC vadovė
Doc. dr. Nida Kvedaraitė

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Diplomantui **Lukui Stirbiui**

Baigiamojo projekto tema (lietuvių kalba)	<i>Automobilių kelių žemės sankasos įrengimo technologijų tyrimas ir daugiakriteris vertinimas</i>
Baigiamojo projekto tema (anglų kalba)	<i>Research and Multi-criteria Evaluation of Road Embankment Technologies</i>

Patvirtinta 2022 m. lapkričio 16 d. dekanato potvarkiu Nr.V25-13-30.

Parengto baigiamojo projekto įkėlimo į Moodle aplinką terminas iki 2022 m. sausio 2 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui

Tiriamasis objektas – automobilių kelių sankasa.

Baigiamojo projekto užduotys / uždaviniai, kurie turi būti atskleisti projekte

- Apžvalginėje dalyje išanalizuoti Lietuvos bei užsienio šalių mokslinę literatūrą susijusią su žemės sankasos įrengimo technologijomis ir tyrimais.*
- Metodologinėje dalyje pateikti daugiakriterių vertinimo metodų klasifikaciją bei MOORA metodo vertinimo algoritmą.*
- Tiriamajoje dalyje pateikti skirtingas automobilių kelių žemės sankasos įrengimo technologijas bei parinkti racionaliausių variantą MOORA metodu. Nustatyti alternatyvų prioritetų eilutę pagal sankasos įrengimo kainos, mechanizmų darbo laiko, žmonių darbo laiko, technologinės pertraukos, grunto laikomosios gebos rodiklius.*

Vadovas **dr. Donatas Aviža**

(vadovo pareigos, vardas, pavardė)

Konsultantas **lekt. Jovita Kaupienė**

(konsultanto pareigos, vardas, pavardė)

Užduotį gavau **Lukas Stirbys**

(studento vardas, pavardė)

2022 m. lapkričio 22 d.

Stirbys, Lukas. Automobilių kelių žemės sankasos įrengimo technologijų tyrimas ir daugiakriteris vertinimas. Magistro studijų baigiamasis projektas vadovas lekt. dr. Donatas Aviža; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): statybos inžinerija, technologijos mokslai (inžinerijos mokslai).

Reikšminiai žodžiai: automobilių keliai, žemės sankasa, MOORA.

Panevėžys, 2023. 68 p.

Santrauka

Baigiamajame magistro projekte analizuojamas automobilių kelių žemės sankasos įrengimas. Darbo tikslas – atlikti automobilių kelių žemės sankasos įrengimo technologijų tyrimą ir daugiakriterį vertinimą MOORA metodu. Baigiamasis projektas sudarytas iš trijų dalių.

Pirmoje dalyje aprašoma sankasos įrengimo aspektai, aprašomas sankasos tyrimų būtinumas.

Antroje dalyje aprašoma tyrimo metodika. Laboratorinio tyrimo statinio apkrovimo plokšte bandymas, kainos sandara, mechanizmų darbo poreikis, žmogaus darbo poreikis, ekspertų apklausos patikimumas ir daugiakriterio MOORA vertinimo skaičiavimai.

Trečioje dalyje aprašomas atliktas tyrimas, kurioje analizuojamos keturių skirtingų rūšių sankasos: sankasos įrengimas su cementu, sankasos įrengimas su geosintetika, sankasos įrengimas su kalkėmis, sankasos įrengimas be priedų. Pateikiamos vertinamosios alternatyvos bei parenkamas racionaliausias variantas MOORA metodu. Nustatytos alternatyvų prioritetų eilutės pagal sankasos įrengimo kainos, mechanizmų darbo laiko, žmonių darbo laiko, technologinės pertraukos, grunto laikomosios gebos rodiklius.

Įvertinus atnaujintus norminius dokumentus, didžiausią laikomąją gebą ir daugiakriterio vertinimo rezultatus, I tiriamasis objektas, kuriame žemės sankasa gerinama 2 % cementu, yra efektyviausias sprendimas.

Darbo apimtis 68p., 21 lentelė, 27 paveikslėlių, 72 literatūros šaltinių.

Stirbys, Lukas. Research and Multi-criteria Evaluation of Road Embankment Technologies. Master's Final Degree Project supervisor lect. dr. Donatas Aviža; Panevėžys Faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Civil Engineering, Technology Sciences (Engineering Sciences).

Keywords: car road, roadbed, MOORA.

Panevėžys, 2023. 68 p.

Summary

The final master's project analyzes the installation of the automobile roadbed. The aim of the work is to carry out a research and multi-criteria assessment of the technologies for the installation of road embankments using the MOORA method. The final project consists of three parts.

The first part describes the aspects of roadbed installation, describes the necessity of roadbed research.

The second part describes the research methodology. Laboratory investigation of static load plate test, price structure, machinery labor demand, human labor demand, expert survey reliability and multi-criteria MOORA evaluation calculations.

The third part describes the research carried out, which analyzes four different types of roadbed: roadbed installation with cement, roadbed installation with geosynthetics, roadbed installation with lime, roadbed installation without additives. Evaluative alternatives are presented and the most rational option is selected using the MOORA method. Alternative priority lines were determined according to the indicators of the price of roadbed installation, working time of mechanisms, working time of people, technological break, soil bearing capacity.

After evaluating the updated normative documents, the maximum bearing capacity and the results of the multi-criteria evaluation, the research object I, in which roadbed improved with 2% cement, is the most effective solution.

Scope of work 68p., 21 tables, 27 pictures, 72 literature sources.

Turinys

Lentelių sąrašas.....	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Teoriniai automobilių kelių žemės sankasos įrengimo technologijų tyrimų ir daugiakriterių vertinimų aspektai	13
1.1. Žemės sankasos įrengimo technologijų samprata ir esmė.....	13
1.2. Automobilių kelių žemės sankasos įrengimo technologijų tyrimų būtinumas.....	22
1.3. Žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimo įranga ir metodai.....	28
1.4. Sankasos stiprinimas cementu.....	34
1.5. Sankasos stiprinimas geosintetika	35
1.6. Sankasos stiprinimas kalkėmis	36
2. Sankasos įrengimo technologijos tyrimo ir daugiakriterio vertinimo metodika	38
2.1. Laboratorinis tyrimas. Statinio apkrovimo plokšte bandymas	38
2.1.1. Bandymo taikymo sritis.....	38
2.1.2. Įranga naudojama bandymui	38
2.1.3. Bandymo sąlygos.....	39
2.1.4. Bandymo aikštelės paruošimas ir įrenginio pastatymas	40
2.1.5. Pradinis plokštės apkrovimas	40
2.1.6. Rezultatų pateikimas	41
2.2. Ekonominis rodiklis – kaina	42
2.3. Mechanizmų ir žmogaus darbo sąnaudos.....	42
2.4. Ekspertų apklausa	43
2.5. Optimizavimo galimybių paieška. Daugiakriteris vertinimas MOORA metodu	44
3. Tiriamoji dalis	46
3.1. Tiriamieji objektai	46
3.2. Statinio apkrovimo plokšte bandymo rezultatai	51
3.3. Kainų rezultatai	53
3.4. Mechanizmų ir žmogaus darbo sąnaudų rezultatai	54
3.5. Technologinė pertrauka	55
3.6. Ekspertų apklausos rezultatai	56
3.7. Daugiakriteris MOORA vertinimas	57
3.7.1. Pagerintos sankasos reitingavimas	60
Išvados.....	62
Literatūros sąrašas	63

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Paruošiamieji žemės sankasos įrengimo darbai [10]	14
2 lentelė. Skirtingo dirvožemio tekstūros apibūdinimas [24].....	20
3 lentelė. Automobilių kelio dangų skirstymas [31].....	25
4 lentelė. Žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimo metodai [34]	28
5 lentelė. Pagrindinio ir papildomo žemės sankasos sluoksnio gruntų santykinės CBR vertės [18]	30
6 lentelė. Trumpa informacija apie I tiriamąjį objektą.	46
7 lentelė. Trumpa informacija apie II tiriamąjį objektą.....	47
8 lentelė. Trumpa informacija apie III tiriamąjį objektą.	49
9 lentelė. Trumpa informacija apie IV tiriamąjį objektą.	50
10 lentelė. Statinio apkrovimo plokšte bandymo rezultatai	51
11 lentelė. Sankasos įrengimo kaina.....	53
12 lentelė. Mechanizmų darbo sąnaudų žiniaraštis	54
13 lentelė. Žmonių darbo sąnaudų žiniaraštis	55
14 lentelė. Technologinės pertraukos poreikis	55
15 lentelė. Atlikta ekspertų apklausa	56
16 lentelė. skirtingų alternatyvų ir tikslų matrica	58
17 lentelė. skirtingų alternatyvų ir tikslų matricos kvadratinės sumos šaknis	58
18 lentelė. Sudaryta normalizuota matrica	59
19 lentelė. Sudaryta svartinė normalizuota matrica.....	59
20 lentelė. Sudarytas rango sąrašas pagal naudingumo laipsnį.....	59
21 lentelė. Sudarytas I-III tiriamojo objekto rango sąrašas pagal naudingumo laipsnį.....	60

Paveikslų sąrašas

1 pav. Žemės sankasos įrengimo žingsniai [8]	13
2 pav. Pylimų įrengimas [14]	16
3 pav. Iškasa (schema) [3]	17
4 pav. Greideriavimas [16]	18
5 pav. Lanksčiosios automobilių kelio dangos žemės sankasos sluoksniai [32]	26
6 pav. Standžiosios automobilių kelio dangos žemės sankasos sluoksniai [32]	27
7 pav. Žemės sankasos laikomosios galios vertinimas [5]	29
8 pav. Laikomosios gebos Kalifornijos rodiklio nustatymas žemės sankasos įrengimo vietoje [18] 30	
9 pav. Atsistatymo modulio (M_r) nustatymas laboratorijos sąlygomis [29]	31
10 pav. Atliktas sankasos stiprinimas cementu [sudaryta autoriaus]	35
11 pav. Geosintetikos pagrindiniai gaminiai: a) geosintetika [48]; b) geotekstinė [49]; c) geotinklas [49]; d) geosintetinė užtvara [49]; e) geokompozitas [49]	36
12 pav. Mechanizmai reikalingi sankasos gerinimui kalkėmis (kairėje traktorinė freza, dešinėje traktorinis kalkių paskleistuvas) [54]	37
13 pav. Reikalinga įranga bandymui atlikti [sudaryta autoriaus]	39
14 pav. Norminė <i>Xlent2</i> reikšmių lentelė [62]	44
15 pav. Pirmojo tiriamojo objekto skersinis konstrukcijos profilis [43]	46
16 pav. Sankasos frezavimas ant paskleisto cemento [sudaryta autoriaus]	47
17 pav. Antrojo tiriamojo objekto skersinis konstrukcijos profilis [66]	48
18 pav. Geotekstilės su geotinklu paklojimas [sudaryta autoriaus]	48
19 pav. Trečiojo tiriamojo objekto skersinis konstrukcijos profilis [69]	49
20 pav. Sankasos frezavimas [sudaryta autoriaus]	50
21 pav. Ketvirtojo tiriamojo objekto skersinis konstrukcijos profilis [70]	50
22 pav. Sankasos profiliavimas [sudaryta autoriaus]	51
23 pav. Grafinis statinio apkrovimo plokšte bandymo rezultatų pateikimas	52
24 pav. Grafinis kainų palyginimas	54
25 pav. Grafinis santykinio svorio pateikimas	57
26 pav. Tiriamųjų objektų grafinis rangų pateikimas	60
27 pav. I-III tiriamųjų objektų grafinis rangų pateikimas	61

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

ES – Europos sąjunga [4];

MOORA – daugiakriterio vertinimo būdas. Vertinimas prasideda nuo skirtingų kriterijų su skirtingomis alternatyvomis matricos sukūrimo. Šį vertinimą sudaro du metodai: santykio analizė ir atskaitos taškų teorija, pradedant anksčiau rasta santykio analize [63];

MEPDG – mechaninis – empirinis dangos projektavimo vadovas [12];

KPT SDK 19 – automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės [71];

MN GPSR 12 – Gruntų pagerinimo ir sustiprinimo rišikliais metodiniai nurodymai [41];

f_r – frakcija. Tai susitarimu nustatytų grunto dalelių matmenų tarpsnis, matuojamas mm [72];

IT ŽS 17 – automobilių kelių žemės darbų atlikimo ir žemės sankasos įrengimo taisyklės [3];

MN GEOSINT ŽT 13 – Geosintetikos naudojimo žemės darbams keliuose metodiniai nurodymai [45].

Terminai:

Keliai – inžinerinis statinys, skirtas transporto priemonių ir pėsčiųjų eismui [55].

Žemės sankasa – grunto statinys, atliekantis dangos konstrukcijos pagrindo (pamato) funkcijas ir įrengiamas iš atvežto ir supilto grunto ir/arba iš neišjudinto natūralaus grunto [3].

Ypatingasis statinys – sudėtingos konstrukcijos ir sudėtingų technologijų statinys. Keliams ir gatvėms priskiriami šie statiniai: valstybinės reikšmės keliai ir A, B, C kategorijų gatvės [55].

Kalifornijos laikomosios gebos rodiklis (*CBR*) – skvarbos bandymas, skirtas žemės sankasos stiprumui įvertinti, siekiant nustatyti jos laikomąją galią [34].

Dinaminis kūginis penetrometras (*DCP*) – prietaisas, nustatantis sankasos tankį tiesiant kelius [34].

Nešiojamasis krintančio svorio deflektometras (*P-FWD*) – prietaisas, nustatantis sankasos tankį tiesiant kelius [34].

Šviesos deflektometras (*LWD*) – prietaisas, nustatantis sankasos tankį tiesiant kelius [34].

Deformacijos modulis (E_v) – parametras apibūdinantis grunto, jo mišinių, nesurištojo, surištojo mišinio sluoksnio laikomąją gebą, kuris nustatomas pagal pirmojo arba pakartotinio statinio apkrovos ciklo deformacijos kreivę [56].

Standumo rodiklis (k_s) – santykis, tarp apkrauto paviršiaus normalinio įtempio σ_0 ir dėl įtempio atsiradusio nuosėdžio [57].

Proktoro tankis ρ_{pr} – didžiausias pasiektas sauso grunto tankis, nustatytas pagal Proktoro bandymo sąlygas, kai tankinimo darbo sąnaudos sudaro apie 0,6 MPa (MN/m^3) [72].

Įvadas

Aktualumas ir naujumas. XXI a. kelia daug iššūkių projektuotojams, tyrėjams ir technologams, kurie kuria ir įrengia krovinio ar keleivinio transporto automobilių kelių dangas. Globalizacija didina naudotojų poreikius ir lūkesčius. Kaip pastebi Radziszewski's ir kt. [6], pagrindinis Europos Sąjungos (ES) automobilių kelių įrengimo tikslas – nutiesti saugų ir ilgai tarnaujantį greitkelių tinklą. Greitkeliai turėtų tapti papildomu pagrindiniu elementu plėtojant ES automobilių kelių tinklą tarp pagrindinių miestų centrų, taip pat jungtis su tarptautine sistema ir kitais Europos keliais. Svarbiausiomis papildomo greitkelių tinklo dalimis taps ruožai, aptarnaujantys šiuo metu nepasiekiamas vietas.

Galima teigti, kad sparčiai vystantis miestams, įgyvendinami įvairūs civilinės inžinerijos projektai, tiesiant vis daugiau naujų kelių. Sankasa – tai kelio inžinerinės sistemos pagrindas. Jeigu sankasa įrengta nekokybiškai, kelias nepasižymės ilgaamžiškumu. Tik visapusiškai užtikrinant žemės sankasos kokybę, galima veiksmingai pagerinti kelių eksploatacines savybes.

Kai kurių mokslininkų (Alharbi's ir kt. [39], Amakye ir kt. [2], Jaffar'as ir kt. [27]) teigimu, automobilių keliai užtikrina pagrindinį sausumos transporto judėjimą, kas, savo ruožtu, garantuoja šalių ekonominę plėtrą bei darbo jėgos mobilumą. Tačiau pastaruoju metu atsiranda tam tikrų problemų, susijusių su automobilių kelių dangos plyšiais bei išdaužomis. Dangų pažeidimai ne tik turi įtakos vairavimo saugumui, greičiui ir komfortui, bet ir trumpina transporto priemonės eksploatavimo laiką.

Temos ištirtumas. Sparčiai augant automobilių kiekiui bei didėjant žmonių mobilumui, nuolat eksploatuojamo automobilių kelių sankasa patiria didelį krūvį. Dėl KPT SDK 19 atnaujintų reikalavimų žemės sankasai, apie 70% projektuojamų susisiekimo statinių (projektuotojų duomenimis) reikalingas žemės sankasos pagerinimas. Todėl, siekiant užtikrinti jos kokybę, būtina iš anksto numatyti ir visiškai patenkinti būsimus transporto priemonių apkrovos poreikius. Tam patartina atlikti žemės sankasos įrengimo technologijų tyrimą bei daugiakriterį vertinimą. Siekiant tai padaryti, atsiranda probleminis klausimas – kokį daugiakriterio vertinimo metodą pasirinkti, norint, kad žemės sankasos įrengimo technologijų tyrimas būtų efektyvus?

Tyrimų objektas: automobilių kelių sankasa.

Darbo tikslas – atlikti automobilių kelių žemės sankasos įrengimo technologijų tyrimą ir daugiakriterį vertinimą MOORA metodu.

Darbo uždaviniai:

1. apžvalginėje dalyje išanalizuoti Lietuvos ir užsienio šalių mokslinę literatūrą susijusią su sankasos įrengimo technologijų samprata, jos tyrimų būtinumą;
2. metodinėje dalyje pateikti daugiakriterio vertinimo metodų klasifikaciją bei MOORA metodo vertinimo algoritmą;
3. tiriamojoje dalyje pateikti sankasos įrengimo vertinamąsias alternatyvas bei parinkti racionaliausią variantą MOORA metodu. Nustatyti alternatyvų prioritetų eilutę pagal sankasos įrengimo kainos, mechanizmų darbo laiko, žmonių darbo laiko, technologinės pertraukos, grunto laikomosios gebos rodiklius.

Tyrimo metodai: mokslinės ir techninės literatūros analizė, daugiakriterio vertinimo metodas (MOORA), ekspertų apklausa, technologijų analizė, sankasos įrengimo technologijų tyrimas, laboratorinis tyrimas, empirinis tyrimas.

Magistro baigiamąjį projektą sudaro: santraukos lietuvių ir anglų kalbomis, įvadas, 3 skyriai, išvados, literatūros sąrašas. Darbą sudaro 68 puslapiai, kuriuose yra 21 lentelė, 27 paveikslėliai ir 72 literatūros šaltiniai.

Autoriaus publikuotas straipsnis: Stirbys L., Kaupienė J. *Automobilių kelių žemės sankasos įrengimo technologijų daugiakriteris vertinimas.* // Technologijų ir verslo aktualijos – 2021: studentų mokslinių darbų konferencijos pranešimų medžiaga, Lietuva, Panevėžys, 2021 m. balandžio 23 d. / Kauno technologijos universiteto Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas. Kaunas: Kauno technologijos universitetas. ISSN 2538-8045. 2021.

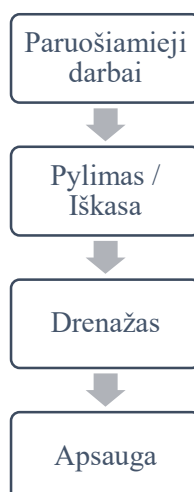
1. Teoriniai automobilių kelių žemės sankasos įrengimo technologijų tyrimų ir daugiakriterių vertinimų aspektai

Per pastaruosius šimtą metų automobilių kelių inžinerija patyrė didžiulius pokyčius, kurie gali būti susiję su konstrukcine sudėtimi, naujomis medžiagomis, automobilių kelių įrengimo technologijomis, projektavimo metodais, eismo poreikiais, aplinkos sąlygomis, medžiagų perdirbimu ir pan. Liu ir kt. [1] teigimu, vienas iš pagrindinių visų įvykusių pokyčių motyvų – pagerinti automobilių kelių dangos pajėgumą. Pagrindinė automobilių kelių dangos funkcija – paskirstyti eismo apkrovą į sankasą ir užtikrinti priimtina važiavimo kokybę, pakankamą atsparumą slydimui ir mažą triukšmo taršą [2]. Tuo tarpu sankasa, kaip nurodoma Automobilių kelių žemės darbų atlikimo ir žemės sankasos įrengimo taisyklėse [3], „grunto statinys, atliekantis dangos konstrukcijos pagrindo (pamato) funkcijas ir įrengiamas iš atvežto ir supilto grunto ir/arba iš neišjudinto natūralaus grunto“ [4]. Siekiant, kad tiesiamas kelias tarnautų ilgai, būtina užtikrinti tinkamą žemės sankasos įrengimo technologiją. Todėl šiame darbo skyriuje pateikti teoriniai žemės sankasos įrengimo technologijų tyrimų bei daugiakriterių vertinimų aspektai, atskleidžiantys žemės sankasos įrengimo technologijų sampratą ir esmę.

1.1. Žemės sankasos įrengimo technologijų samprata ir esmė

Žemės sankasos įrengimas, anot Zhang'o ir kt. [5] – tai sudėtingas procesas dėl daugybės būtiniausių darbų, įskaitant kasimą, vežimą, pylimą, drenažo įrengimą, sutankinimą ir pan. Subroto atkreipia dėmesį, kad sankasa taip pat lemia tinkamą tiesiamo automobilių kelio konstrukciją, nes jos savybės riboja konstrukcijos galimybes ir stiprumą [6]. Todėl prieš pradėdant analizuoti žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimą, būtina aptarti žemės sankasos įrengimo technologijų esmę.

Kamal'as ir Bas'as [7] žemės sankasos įrengimo technologiją apibūdina trimis žingsniais: 1) aikštelės paruošimas; 2) žemės darbai; 3) žemės sankasos įrengimas [7]. Tuo tarpu Zhang'as [8] straipsnyje „Diskusija apie automobilių kelių žemės sankasos įrengimo technologijas civilinėje inžinerijoje“ nurodo šiuos pagrindinius žemės sankasos įrengimo žingsnius (žr. 1 pav.).



1 pav. Žemės sankasos įrengimo žingsniai [8]

Paruošiamieji darbai. Zhang'as ir kt. [5] teigia, kad šiame etape pirmiausiai reikia pasirūpinti pakankamu darbuotojų skaičiumi, visapusiškai paruošti įrangą ir medžiagas. Paruošiamieji darbai

atrodo nesudėtingi, tačiau iš tikrųjų tai yra žemės sankasos įrengimo pagrindas. Mokslininkai akcentuoja, kad paruošiamųjų darbų etape privaloma atlikti šiuos būtiniausius veiksmus:

- kruopščiai išanalizuoti ir gerai suplanuoti žemės sankasos įrengimo procesą. Atlikti statyb vietės geologinius tyrimus, įvertinti dirvožemio kokybę. Tada kruopščiai užrašyti ir palyginti gautą informaciją, siekiant nustatyti, ar statyb vietė atitinka keliamus reikalavimus. Dirvožemio tyrimas yra neatsiejama automobilių kelių vietos nustatymo, projektavimo ir statybos dalis. Parenkant automobilių kelio vietą reikia atsižvelgti į dirvožemio sąlygas, topografiją, žemės naudojimą, aplinkosaugos problemas ir politines aplinkybes. Dirvožemio tyrimas suteikia svarbios informacijos apie dirvožemį ir uolienas sprendimams, susijusiems su:
 - automobilių kelio tiesimo vieta;
 - natūralaus pagrindo apdorojimo būtinumu;
 - šlaitų stabilumo tyrimų poreikiu įpjovose ir pylimuose;
 - griovių ir pralaidų vietų projektavimu;
 - automobilių kelio dangos parinkimu ir projektavimu;
 - reikalingų statybinių medžiagų paieška ir įvertinimu;
 - tiltų ir kitų statinių pamatų projektavimu [9].
- nuolat kontroliuoti įvairias veiklas. Pavyzdžiui, numatyti žemės sankasos įrengimo veiklų laiką ir kiekį, o tolesnis planavimo ir projektavimo etapas turėtų būti grindžiamas jais. Reikėtų atsižvelgti ne tik į oro sąlygas, aplinką ir kitus veiksnius, bet ir į darbo jėgą bei susijusias medžiagas, kurios bus reikalingos būtent tą darbo dieną [4];
- pastoviai stebėti, ar nėra problemų, ar mašinos ir naudojami mechanizmai dirba maksimaliai našiai, ar personalo išdėstymas tinkamas [5].

Tuo tarpu Jones'o [10] nuomone, paruošiamieji žemės sankasos įrengimo darbai gali būti suskirstyti į šias kategorijas: parengiamąją veiklą, vykdomą gerokai prieš žemės sankasos įrengimo darbus, operatyvinę veiklą prieš pat pradėdant žemės sankasos įrengimo darbus, operatyvinę veiklą žemės sankasos įrengimo metu, operatyvinę veiklą baigus žemės sankasos įrengimo darbus (žr. 1 lentelę).

1 lentelė. Paruošiamieji žemės sankasos įrengimo darbai [10]

Darbo kategorija	Apibūdinimas
Parengiamoji veikla, vykdoma prieš žemės sankasos įrengimo darbus	<ul style="list-style-type: none"> - vietos apžiūra, siekiant įvertinti vietos sąlygas, pagrindinius darbo vietos reikalavimus ir nustatyti bei surasti reikalingas paslaugas; - darbų kokybės, eismo valdymo, darbuotojų saugos ir sveikatos bei aplinkosaugos planų rengimas; - darbų programos parengimas, kurioje: 1) būtų parodytas loginis ryšys tarp veiklų, 2) nustatyti laiko trikdžiai, 3) išteklių ir kiti apribojimai bei 4) veiklų, sudarančių kritinį kelią, seka; - visų projektavimo reikalavimų, kurie neįtraukti į brėžinius ir statybos specifikacijas arba už kuriuos atsako eksploatuotojai, nustatymas ir parengimas (t. y. žemės darbų sluoksnių storai ir valkšnumo schemas, purškiamo sandariklio projektinės rišamosios medžiagos ir užpildų normos, asfalto jungčių išdėstymo planai); - medžiagų tiekėjų, įrangos, gamyklų, atsargų kaupimo vietų, darbo vietų, sutartinių susitarimų parengimas; - skelbimas apie darbų pradžios datą, pobūdį ir poveikį bei išankstinis įspėjimas gretimų nekilnojamojo turto objektų gyventojams.

Darbo kategorija	Apibūdinimas
Operatyvinė veikla prieš žemės sankasos įrengimo darbus	<ul style="list-style-type: none"> - įvertinimas, ar reikia atlikti papildomus paviršiaus paruošimo darbus (labai svarbu purškiamoms bituminėms dangoms ir asfalto dangoms); - aplinkosaugos reikalavimų (įskaitant erozijos ir nuosėdų susidarymo kontrolę) nustatymas; - eismo kontrolės plano tikrinimas; - saugos įrangos, tinkamai apmokyto personalo, įrenginių ir medžiagų prieinamumo tikrinimas; - profesinės sveikatos ir saugos klausimų sprendimas; - kitų sąlygų, kurios gali trukdyti darbams (vietos teisės aktai, laiko apribojimai, priešgaisriniai draudimai ir t. t.), identifikavimas; - atitikties sertifikatų ir bandymų ataskaitų gavimas.
Operatyvinė veikla žemės sankasos įrengimo metu	<ul style="list-style-type: none"> - užtikrinimas, kad darbų vieta būtų tinkamai paženklinta pagal eismo valdymo planą; - darbų žymėjimas (žemės darbų ribos, purkštuvų važiuojamoji dalis, asfalto frezavimo zonos, sandūros ir t. t.); - oro sąlygų stebėjimas; - nuolatinis gaunamų medžiagų kokybės ir atitikimo reikalavimams tikrinimas; - kasdienių darbų apskaitos dokumentų pildymas.
Operatyvinė veikla baigus žemės sankasos įrengimo darbus	<ul style="list-style-type: none"> - visų neatitikčių ištaisymas; - visos įrangos ir perteklinių medžiagų pašalinimas iš vietos; - atitikties įrašų (bandymų ataskaitų, apžiūros ataskaitų, patikros kontrolinių sąrašų) kaupimas ir saugojimas; - žemės sankasos brėžinių pateikimas užsakovams.

Kaip matyti iš informacijos, pateiktos pirmoje lentelėje, paruošiamųjų automobilių kelių žemės sankasos įrengimo darbų etape labai svarbu nustatyti galimas žemės sankasos problemas. Jei problemos nenustatomos, pakartotinė apkrova, atsirandanti klojant automobilių kelio dangą, pažeidžia sankasą, kurią vėliau teks remontuoti. Žemės sankasos remontui reikia papildomo laiko, per kurį gali tekti atsisakyti į darbo vietą pristatyto betono ar karšto asfalto mišinio. Be to, jei karšto mišinio asfalto danga neatitinka tankio reikalavimo dėl pumpuojamo grunto, ją gali tekti pašalinti ir keisti rangovo sąskaita arba koreguoti sutarties kainą [11]. Paruošiamųjų žemės sankasos įrengimo darbų etape taip pat labai svarbu numatyti žemės sankasos įrengimo pabaigą, automobilių kelio dangos tiesimo pradžią ir pabaigą bei eismo pradžios datas [12].

Savo ruožtu Abija ir kt. [13] prie žemės sankasos įrengimo technologijų paruošiamųjų darbų priskiria išsamų natūralaus grunto, ant kuriuo bus įrenginėjama sankasa, vertinimą. Tai, anot minėtų mokslininkų, būtina, nes grunto reakcija į apkrovą lemia žemės sankasos, ir, atitinkamai, visos automobilių kelio dangos, kokybę. Dėl to reikia išsamiai įvertinti vietovės sąlygas ir natūralaus pagrindo savybes. Esminė aplinkybė šiame procese – geologiniai procesai, kuriems vykstant susiformavo siūlomo projekto vietos dirvožemiai ir (arba) uolienos. Siekiant įvertinti dirvožemio bei uolienu savybes, atliekami vietovės tyrimai, kurie sudaro pagrindą vertinti vietovės tinkamumą siūlomam inžineriniam projektui ir rengti tinkamus bei ekonomiškus projektus. Kiti svarbūs veiksniai, į kuriuos būtina atsižvelgti atliekant žemės sankasos įrengimo paruošiamuosius darbus:

- natūralių gruntų pobūdis;
- gruntų fizinės ir inžinerinės savybės;
- gruntų vertikalus ir skersinis pasiskirstymas ir kitimas;

- topografija;
- iškasos aplink žemės sankasos įrengimo vietą;
- karjerai;
- skardžiai;
- erozijos požymiai;
- geohidrologinės, potvynių žymės;
- drenažo grioviai;
- gretima augmenija;
- požeminiai darbai;
- tektoniniai režimai seismiškai aktyviose teritorijose;
- dirvožemio stratigrafija;
- apleisti sąvartynai;
- susitraukimo plyšiai,
- įtempimo plyšiai;
- šlaitų nestabilumas ir polinkis į nuošliaužas [13].

Pylimas – labai svarbi žemės sankasos įrengimo technologijų grandis (žr. 2 pav.). Zhang'o [8] teigimu, užpildant gruntą, žemės sankasos įrengimo metu naudojamos vietinės medžiagos ir natūralus gruntas. Siekiant užtikrinti žemės sankasos užpylimo kokybę, prieš užpylimą būtina iširti natūralų dirvožemį ir įsitikinti, kad jis atitinka užpylimo standartą [8]. Zhang'o ir kt. [5] pastebėjimu, žemės sankasos gruntas turi būti pakankamai stabilus, t. y. turi būti išvengta bendro žemės sankasos nestabilumo ar deformacijos, o pylimas turi būti pakankamai tvirtas, kad sankasa nesideformuotų ir išliktų numatyto leistino diapazono ribose [5].

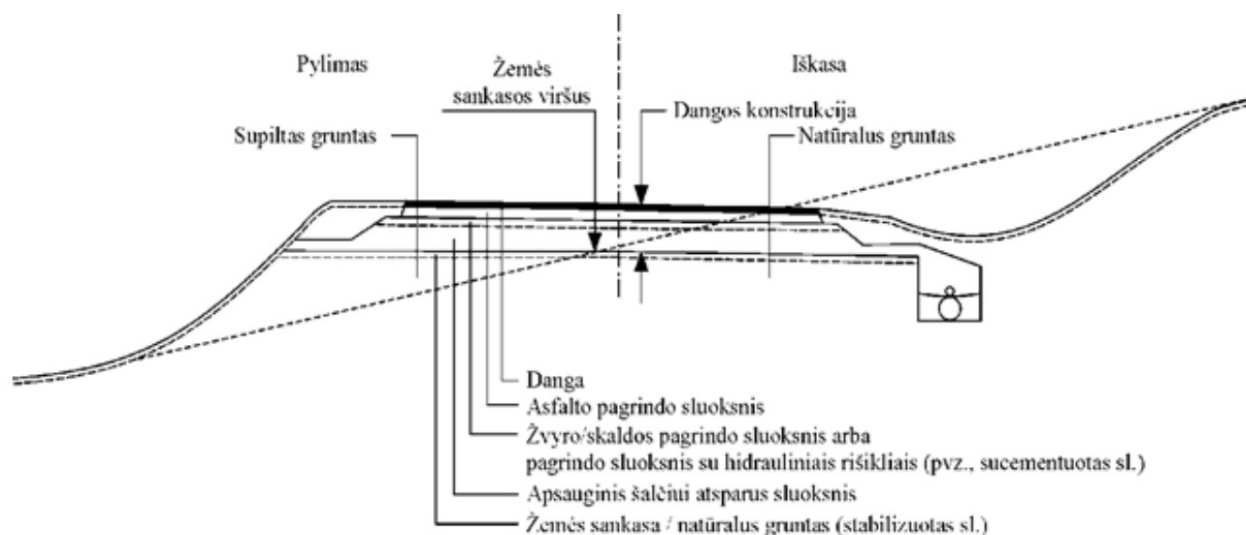


2 pav. Pylimų įrengimas [14]

Kaip matyti iš antro paveikslo, į automobilių kelio tęsimo vietą atvežamas smėlys ir specialios technikos pagalba supilamas ir išlyginamas pagal iš anksto pažymėtas vietas. Abija [15] pastebi, kad pylimo įrengimui vietoj smėlio taupumo sumetimais kartais naudojamas dirvožemis. Tačiau, anot mokslininko, dirvožemio nevienalyčių ir dažnai anizotropinių mineralinių grūdelių agregatų sudėtis ir gradacija labai skiriasi, todėl neįmanoma nuspėti jų inžinerinės elgsenos ir veikimo, reaguojant į apkrovas esant natūralioms laiko ir erdvės sąlygoms [15].

Pylimas įrengiamas iš palyginti plonų pūrus grunto sluoksnių. Kiekvienas sluoksnis sutankinamas iki nustatyto tankio prieš klojant kitą sluoksnį, o po to pylimas keliais keltuvais suformuojamas iki norimos formos ir aukščio. Be to, būtina labai atidžiai įvertinti natūralaus grunto savybes ir patikrinti grunto vandens kiekį bei mechanines savybes. Siekiant pagerinti užpildymo kokybę, būtina išmatuoti užpildytas automobilių kelio atkarpas, įsisavinti automobilių kelio sąlygas ir iš anksto atlikti pylimo bandymą. Tik padarius teisingas išvadas galima vykdyti žemės sankasos įrengimą ir visiškai užtikrinti bendrą žemės sankasos kokybę, atitinkančią automobilių kelių įrengimo reikalavimus [10].

Iškasa – taip pat labai svarbi žemės sankasos įrengimo technologijų grandis. Zhang'o [8] pastebėjimu, prieš pradėdant kasimo darbus, būtina gerai įvertinti esamą situaciją, t.y. nustatyti esamą iškasos grunto struktūrą ir įvertinti grunto būklę tam, kad būtų užtikrintas žemės sankasos įrengimo proceso saugumas. Minėtas mokslininkas siūlo griežtai klasifikuoti dirvožemio kokybę pagal statybos standartus ir iš anksto pasirinkti dirvožemio apsaugos nuo ardymo metodus. Siekiant užtikrinti iškasų kokybę, taip pat būtina išvalyti gruntą ir iškasti paviršių, numatyti perėmimo griovius ir drenažus. Automobilių kelių žemės darbų atlikimo ir žemės sankasos įrengimo taisyklėse [3] nurodoma, kad taip įrengtos žemės sankasos gali būti su atvirais grioviais arba su pogrioviniais drenažais (žr. 3 pav.).



3 pav. Iškasa (schema) [3]

Kaip matyti iš trečio paveikslo, sankasa įrengiama iškasoje arba ant pylimo, o žemės sankasos parametrus lemia geologinės, hidrologinės, gamtinės sąlygos. Be to, žemės sankasos parametrai priklauso ir nuo įrenginėjamo automobilių kelio tipo. Keliai tiesiami keliais sluoksniais, kuriuos sudaro žemės sankasa / natūralus gruntas, apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis, žvyro / skaldos pagrindo sluoksnis arba pagrindo sluoksnis su hidrauliniiais rišikliais, asfalto pagrindo sluoksnis. Šie sluoksniai kartu sudaro automobilių kelio dangą. Iš geros kokybės statybinių medžiagų pagamintos dangos paskirsto eismo keliamas jėgas taip, kad automobilių kelio sankasą veikiančios apkrovos apsaugotų nuo perkrovų ir deformacijų. Žemės sankasos įrengimui reikalingų medžiagų pasirinkimą ir storį lemia numatomas eismo intensyvumas [3].

Žemės sankasos nuolydis turi užtikrinti stabilumą ir išvengti aplinkinių pastatų poveikio statyboms. Pagal pagrindinius projektavimo reikalavimus būtina atidžiai perskaityti brėžinių reikalavimus. Be to, įrenginėjant sankasas, nuo pat aikštelės paruošimo pradžios darbų, naudojama speciali technika (žr. 4 pav.).



4 pav. Greideriavimas [16]

Smulkaus grunto, skirto žemės sankasos pagrindo sluoksniams, greideriavimas paprastai atliekamas autogreideriu, tačiau gali būti atliekamas ir automatine greideriavimo mašina. Automatinė greideriavimo mašina turi būti naudojama ruošiant sankasą standžiai automobilių kelio dangai. Kai iš anksto nurodomi apatiniai drenažai, reikia ypač atidžiai stebėti, kad nebūtų pažeisti drenažai ir kad agregatų užpildas nebūtų užterštas gruntu [17]. Kaip matyti, ekskavatoriai ir savivarčiai naudojami kaip žemės sankasos įrengimo priemonės, tačiau, jeigu geologinė padėtis nėra tinkama naudoti įrangą ir mašinas, specialiose teritorijose tenka naudoti fizinę darbo jėgą [8].

Drenažas. Požeminio drenažo įrengimas daugiausia skirtas ilgesniam automobilių kelių eksploatavimo laikui užtikrinti, taip pat sumažinti požeminio vandens eroziją ir pagerinti automobilių kelio parametrus. Įrengiant drenažą:

- pirmiausia būtina kompleksiskai apdoroti dideliame plote susikaupusį vandenį. Drenažui galima naudoti vandens siurblių drenažą arba, atsižvelgiant į reljefo sąlygas, iškasti drenažo griovius, kad būtų užtikrintas greitas didelėse teritorijose susikaupusio vandens nutekėjimas;
- antra, reikėtų tvarkyti paviršinį vandenį. Daugiausia naudojami slenksčiai ir grioviai, kad paviršinį vandenį būtų galima greitai pašalinti, o statybos eiga ir kokybė nenukentėtų;
- trečia, požeminio vandens prevencija ir kontrolė. Labai svarbu aiškiai žinoti požeminio vandens lygį. Priklausomai nuo vandens lygio turėtų būti parenkami skirtingi drenažo būdai, o nusausinimui dažniausiai naudojamas aklas griovys, požeminis griovys ir gilus šulinys [8].

Projektavimo vadove (2022), analizuojant žemės sankasos paskirtį, teigiama, kad siekiant pailginti automobilių kelio dangos tarnavimo laiką, sankasa turi užtikrinti drenažą ir stabilumą. Kitaip sakant, viena iš žemės sankasos funkcijų – nuleisti perteklinį vandenį, kuris gali pakenkti automobilių kelio dangos tarnavimo laikui. Tačiau pralaidžių pagrindų užpildų medžiagos turi būti kruopščiai parinktos ir įrengtos taip, kad būtų užtikrintas ne tik pralaidumas, bet ir tolygus automobilių kelio dangos stabilumas. Atkreiptinas dėmesys, kad pernelyg didelis žemės sankasos sutankinimas gali pakeisti gradaciją, o dėl to gali atsirasti papildomų smulkių dalelių, dėl kurių pralaidumas bus mažesnis nei nustatyta laboratoriniais tyrimais [18].

Be to, jei po pylimu susidaro drėgmė, siūloma sulaikyti požeminio vandens srautą įrengiant gilius požeminius drenažus, drenažo rinktuvus ir (arba) pralaidas tam, kad būtų sumažintas drėgmės kiekis po sankasa esančiame dirvožemyje. Siekiant, kad požeminis vanduo būtų veiksmingai sulaikomas ir

drenuojamas lygumoje esančioje vietovėje, kurią sudaro smulkiagrūdis ir drėgmei jautrus molingas dumblo dirvožemis, paprastai tokį drenažą būtina įrengti gerokai anksčiau prieš žemės darbus, kad būtų laiko pažeminti gruntinio vandens lygį dirvožemyje, kuris paprastai yra palyginti mažai pralaidus [10]. Būtina atkreipti dėmesį, kad paprastai neįmanoma įrengti paviršinio drenažo iš nupjautų vietų. Išgilintų plotų dydis yra ribotas, o išpjovimo grafikas reguliuojamas taip, kad plotas neliktų atviras, kai tikėtinas lietus. Vandens tvenkiniai iškirstoje zonoje greičiausiai pablogintų drėgmės pertekliaus problemas, kurioms sumažinti buvo skirtas iškirstas plotas. Galutiniai drėgmės ir tankio bandymai bei kontrolinis valcavimas atliekami viršutiniuose 20 cm užbaigtos žemės sankasos pagrindo, prieš asfaltavimo darbų pradžią [17].

Žemės sankasos apsaugai, siekiant užtikrinti jos stabilumą, turėtų būti naudojama šalčiui atspari augmenija su išvystytomis šaknimis. Be to, Fay ir kt. [19] teigimu, žemės sankasos apsaugai galima naudoti daugybę metodų, įskaitant keletą ekonomiškai efektyvių ir tvarių variantų. Kiekviena statybvieta yra unikali, todėl labai svarbu suprasti statybvietaje esančio vandens kiekį ir sudėtį, dirvožemį, topografiją, taip pat rangovų ir užsakovų poreikius, prieš pasirenkant tinkamiausią žemės sankasos apsaugos būdą ir metodą. Tam reikėtų atlikti išsamų vietovės, kurioje tiesiamas kelias, vertinimą. Jame turi būti pateikta informacija apie dirvožemio tipus ir savybes, paviršinio ir požeminio vandens sąlygas, taip pat atsižvelgta į trumpalaikį ir ilgalaikį darbų planavimą [19]. Metodai, kurie dažnai naudojami planuojant ekonomiškai efektyvią žemės sankasos apsaugą, apima floros ir faunos klausimų nagrinėjimą planavimo etape, atsižvelgimą į konkrečių produktų ir medžiagų naudojimą bei aiškų vietovių, kuriose gali būti pažeistas dirvožemis, žymėjimą. Atkreiptinas dėmesys, jog planuojant žemės sankasos apsaugą, būtina turėti omenyje, kad dirvožemio masė yra porėta medžiaga, kurioje yra kietųjų dalelių, tarp kurių yra porų arba tuštumų. Šios ertmės gali būti užpildytos oru, vandeniu arba ir oru, ir vandeniu. Dirvožemio, oro ir vandens santykiniam kiekiui dirvožemio masėje apibrėžti vartojami keli terminai:

- tankis – dirvožemio tūrio vieneto masė. Jis gali būti išreiškiamas drėgnuoju tankiu (įskaitant dirvožemį ir vandenį) arba sausuoju tankiu (tik dirvožemis);
- akytumas – tuštumų tūrio ir visos masės tūrio santykis, neatsižvelgiant į tuštumose esančio oro ar vandens kiekį. Akytumas paprastai išreiškiamas procentais;
- tuštumų santykis – tuštumų tūrio ir dirvožemio dalelių tūrio santykis. Dirvožemio poringumas ir tuštumų santykis priklauso nuo sutankinimo arba sujungimo laipsnio. Todėl tam tikro dirvožemio skirtingomis sąlygomis poringumo ir tuštumų santykis skiriasi ir gali būti naudojami vertinant santykinį stabilumą ir laikomąją galią, o šie veiksniai didėja mažėjant poringumui ir tuštumų santykiui;
- prisotinimo laipsnis – vandens tūrio ir tuštumų tūrio santykis, paprastai išreiškiamas procentais [17].

Analizuojant teorinius automobilių kelių žemės sankasos įrengimo technologijų klausimus pavyko išsiaiškinti, kad žemės sankasos įrengime naudojamos medžiagos turi būti gerai surūšiuotos, susmulkintos, patvarios, o pati sankasa – tolygiai sudrėkinta ir mechaniškai stabilizuota tankinant [21]. Atliekant įrengtą žemės sankasos vertinimą reikia atkreipti dėmesį į keletą aspektų, tokių kaip pagrįstas statybinės įrangos išdėstymas, retas bandomojo grunto mėginio indeksas ir tankinimo laikas. Žemės sankasos įrengimas turėtų būti atliekamas pagal griežtai kontroliuojamą procesą ir atitikti žemės sankasos įrengimo standartus. Žemės sankasos įrengimas turėtų būti vykdomas atsižvelgiant į dirvožemio struktūrą, o skirtingų lygių storis turėtų būti pagrįstai kontroliuojamas [22].

Tuo tarpu Ping'as [23], analizavęs automobilių kelio žemės sankasos įrengimo technologiją greitkelių inžinerinėje statyboje, pastebi, kad vykdant greitkelių inžinerinę statybą pagal akmenimis užpildytos automobilių kelio žemės sankasos įrengimo technologiją, būtina sustiprinti automobilių kelio žemės sankasos pagrindo apdorojimą tam, kad jis atitiktų sudėtinio stabilumo reikalavimus. Anot minėto mokslininko, optimizuojant tradicinę žemės sankasos įrengimo technologiją, pereinamųjų sluoksnių skaičius turi būti apie 3, o kiekvieno sluoksnio storis – 40-55 cm. Norint optimizuoti žemės sankasos įrengimo technologiją naudojant automobilių kelio žemės sankasos užpylimą uolienomis, reikia naudoti smulkiagrūdį gruntą kartu su kitomis medžiagomis. Tai leis padidinti žemės sankasos stabilumą [23]. Paprastai sankasą sudaro šių rūšių gruntas, klasifikuojamas toliau nuo minkščiausio iki kiečiausio:

- dirvožemis (augmenijos liekanos);
- molis;
- smėlis;
- žvyras;
- akmenys [6].

Subroto [6] pastebėjimu, dirbant su pirmomis dviem rūšimis (durpinis dirvožemis ir molis), gali prireikti pakeisti sankasą tam tikrame gylyje. Ją galima pakeisti smėliu, kurio galima įsigyti beveik visose šalyse ir palyginti pigiai. Esant nedideliame eismui, pakeitimo galima išvengti įmaišant tam tikrų stabilizatorių, kurie pagerina žemės sankasos stiprumą ir laikomąją galią. Kai pagrindą sudaro smėlis, žvyras ar uoliena, paprastai žemės sankasos nereikia tobulinti. Tačiau primygtinai rekomenduojama patikrinti standumo modulį laboratorijoje, siekiant išsiaiškinti, ar jo vertės didesnės, negu 100 MPa [6]. Mokslinių šaltinių analizė leidžia teigti, kad dažniausiai, pirminė medžiaga, apie kurią svarsto inžinieriai įrenginėjant sankasą – tai vietinio dirvožemio panaudojimas. Dirvožemio tekstūra pateikiama tam, kad keliais žodžiais būtų galima kuo daugiau pasakyti apie žemės sankasos įrengimui naudojamą dirvožemį. Nustačius tekstūrą, galima apytiksliai apskaičiuoti ir įvertinti dirvožemio savybes, pavyzdžiui, laikomąją galią, vandens sulaikymo gebą, jautrumą šalčiui ir pan. Siekiant apytiksliai klasifikuoti žemės sankasos įrengimui planuojamo naudoti dirvožemio tekstūrą, galima sukurti daug praktinių nuorodų, leidžiančių nustatyti dumblo ir molio kiekį dirvožemyje. Tačiau kadangi molio kiekio diapazonas tekstūrinėse grupėse nėra didelis, būtina tiksliai pasverti mėginius, o tam reikia atlikti laboratorinius bandymus. Dažnai dirvožemio identifikavimo ir aprašymo inžineriniais tikslais procedūra būna pagrįsta vizualiniu patikrinimu ir paprastais rankiniais bandymais. Dirvožemio tekstūros tipai išvardyti lentelėje (žr. 2 lentelę).

2 lentelė. Skirtingo dirvožemio tekstūros apibūdinimas [24]

Dirvožemio tekstūra	Apibūdinimas
Smėlis	Randamas tik nedideliais kiekiais arba jo visai nėra. Jų randama paplūdimiuose, kopose arba upelių vagų nuosėdose. Atskiri grūdėliai lengvai matomi ir apčiuopiami. Sausą dirvožemį suspaudus ranka, šis dirvožemis, atleidus spaudimą, suyra. Suspaustas drėgnas jis suformuoja gumulą, kuris, atleidus spaudimą, išlaiko formą, bet palietus sutrupa.
Dulkingas smėlis	Sudarytas daugiausia iš smėlio, tačiau jame yra pakankamai dumblo ir molio, kurie suteikia jam nedidelį stabilumą. Atskiri smėlio grūdėliai lengvai pastebimi ir apčiuopiami. Sausą dirvožemį suspaudus rankoje, jis suyra, kai spaudimas atslūgsta. Suspaustas drėgnas jis suformuoja liejinį, kuris ne tik išlaiko savo formą, kai spaudimas atslūgsta, bet ir atlaiko atsargų rankos paspaudimą, nesulūžta. Drėgno dirvožemio stabilumas skiria šį dirvožemį nuo paprasto smėlio.

Dirvožemio tekstūra	Apibūdinimas
Dumblas	Sudarytas iš didelio kiekio dumblo dalelių, be smėlio ir molio arba su nedideliu jų kiekiu. Sauso, netrikdyto dirvožemio gabalėliai atrodo gana grumstiški, tačiau juos galima lengvai susmulkinti; tada dirvožemis atrodo minkštas ir miltingas. Šlapias priemolis susilieja ir susidaro balos. Tiek sausus, tiek drėgnus luitus galima laisvai tvarkyti, jų nesulaužant. Suspaudus drėgno dirvožemio rutuliuką tarp nykščio ir piršto, jo paviršiaus drėgmė išnyks ir jis nesusispaus į lygią, nenutrūkusią juostą, o atrodys suskilęs.
Dulkingas molis	Sudarytas iš plastiškų (rišlių) smulkiųjų dalelių, sumaišytų su dideliu kiekiu dumblo. Tai smulkios tekstūros dirvožemis, kuris išdžiūvęs suskyla į kietus grumstus ar gabalus. Suspaudus drėgno dirvožemio rutuliuką tarp nykščio ir piršto, susidaro plona juostelė, kuri lengvai lūžta, vos išlaikydama savo svorį. Drėgnas dirvožemis yra plastiškas ir suformuoja liejinį, kuris atlaiko nemažą spaudimą.
Molis	Smulkios tekstūros dirvožemis, kuris sausas suskyla į labai kietus grumstus ar gabalus, o drėgnas yra plastiškas ir neįprastai lipnus. Suspaudus drėgno dirvožemio rutuliuką tarp nykščio ir piršto, susidaro ilga juosta.
Sunkus molis	Labai plastiškas molis; pasižymi moliui būdingomis savybėmis.
Lengvas molis	Vidutiniškai plastiškas molis; pasižymi moliui būdingomis savybėmis, tačiau mažesniu laipsniu.

Adacha [25] pastebėjimu, dažnai dirvožemiai naudojami kaip žemės sankasos sluoksnio užpildymo medžiagos. Tačiau šie nevienalyčiai ir dažnai anizotropiniai mineralinių grūdelių agregatai labai skiriasi savo sudėtimi ir gradacija, todėl jų inžinerinės elgsenos ir eksploatacinių savybių, reaguojant į veikiančias apkrovas, nuspėjamumas esant natūraliam nuoseklumui laike ir erdvėje neįmanomas. Bet kokios konstrukcijos stabilumas priklauso nuo medžiagos sudėties, o automobilių kelių atveju nuo pagrindo stiprumo, prisotinimo laipsnio ir numatomos elgsenos prisotintomis sąlygomis priklauso dangos infrastruktūros stabilumas, eksploatacinės savybės ir ilgaamžiškumas. Be to, anot minėto mokslininko, geotechninės natūralių gruntų savybės tiesiogiai veikia ne tik žemės sankasos įrengimo technologiją, bet ir lemia, kokio tipo danga labiausiai tinka konkrečioje vietoje [25]. Todėl, tiesiant automobilių kelio dangą, būtina atlikti žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimą.

Kaip matyti, žemės sankasos įrengimo vietoje esantis dirvožemis ne visada tinka naudoti kaip statybinė medžiaga, nes jo savybės dažniausiai neatitinka pageidaujamų geotechninių reikalavimų. Jain^{as} ir kt. [26] atliko lyginamąjį tyrimą, kuriuo metu analizavo žemės sankasos savybes, naudodant skirtingų tipų gruntą. Siekiant pakeisti netinkamas grunto geotechnines savybes taip, kad jos atitiktų konkrečius reikalavimus, minėti mokslininkai naudojo skirtingas priemaišas, kurios paprastai vadinamos grunto stabilizavimo ir (arba) grunto modifikavimo priedais. Keletas metodų, kurie buvo pritaikyti gruntui stabilizuoti, apėmė mechaninį stabilizavimą, polių injekciją, išankstinį apkrovimą, asfalto stabilizavimą ir armuojamųjų medžiagų naudojimą. Mokslininkai nustatė, kad cheminis stabilizavimas atskirai arba kartu su pramoninėmis atliekomis, tokiomis kaip lakieji pelenai, karjerų dulkės, maltas granuliuotas aukštakrosnių šlakas ir ryžių lukštai yra ekonomiškiausias ir perspektyviausias metodas grunto savybėms pagerinti [26].

Būtina atkreipti dėmesį, kad ne visada žemės sankasos įrengimo vietoje randamas tinkamas natūralus gruntas, todėl jo savybes galima pagerinti taikant įvairius stabilizavimo būdus, atsižvelgiant į automobilių kelio dangos projekto įrengimo ekonomiškumą. Pavyzdžiui, prastas natūralaus pagrindo gruntas, kuriame randama ekspansyvaus grunto, labiau linkęs brinkti ir trauktis, kai sąveikauja su

vandeniui. Manoma, kad taip elgiamasi dėl gausių molio mineralų montmorilonito. Tokią ekspansinio grunto elgseną, anot Jaffar ir kt. [27], galima sumažinti naudojant tam tikrus cheminius priedus. Smėlingų dirvožemių pagerinimas taikant grunto injekcijos technologiją, naudojant ekspansyvią poliuretano dervą, lemia mažesnę nusėdimą ir galutinį dirvožemio stabilizavimą [27].

Apie žemės sankasos kokybės ir grunto savybių sąsajas taip pat rašo Modeer'as [11], teigdamas, kad žemės sankasos įrengimo problemos paprastai nustatomos grunto tyrimo etape, kurio metu parengiama konkreta projekto geotechninė ataskaita. Ataskaitoje dažnai nurodomos probleminės grunto sritys. Projekto geotechninėje ataskaitoje dažnai rekomenduojamos apdorojimo ribos (ilgis, plotis ir storis) ir tinkamiausias apdorojimo būdas (geriausiai atitinkantis grunto tipą ir būklę). Šios rekomendacijos taip pat įtraukiamos į sutarties dokumentus. Tačiau geotechninėje ataskaitoje pateiktos apdorojimo rekomendacijos laikomos apytikslėmis, nes jos pagrįstos grunto duomenimis, gautais iš atskirų dirvožemio gręžinių, kurie paprastai būna išdėstyti 30 – 150 m atstumu. Informacija apie gruntą tarp gręžinių grindžiama geotechnikos inžinieriaus interpretacijomis. Svarbu, kad lauko inspektorius, prieš rangovui pradėdant sanavimą, patikrintų geotechninėje ataskaitoje rekomenduojamą apdorojimą (tipą, storį ir ribas), naudodamasis specialiomis procedūromis [11]. Be to, kokybės kontrolė įrenginėjant sankasą, anot Amadi ir kt.– esminė automobilių kelio dangos klojimo technologinio proceso planavimo dalis, nes ji užtikrina, kad galutinis produktas atitiktų projektines specifikacijas ir automobilių kelio dangos eksploatacines savybes [28]. Pastaruoju metu labai išaugus eismo apkrovoms ir dėl daugybės automobilių kelio dangos gedimų, susijusių su silpnu natūraliu gruntu, žemės sankasos kokybės kontrolė tapo dar svarbesnė sėkmingam automobilių kelio dangos tiesimui [29].

Kaip matyti, žemės sankasa – tai svarbus automobilių kelio dangos sluoksnis, kuris atlieka antrinio apkrovos paskirstymo sluoksnio, drenažo sluoksnio ir paruošiamojo pagrindo automobilių kelio dangos konstrukcijos sluoksnio funkcijas. Žemės sankasos sluoksnio standumas svarbus tuo, kad prisideda prie automobilių kelio dangos stiprumo [29]. Be to, žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimo būtinumas Projektavimo vadove (2022) grindžiamas tuo, kad tinkamai įrengta sankasa užtikrina automobilių kelio dangos konstrukcijos laikomąją galią, o žemės sankasos dydis, forma ir standumas yra svarbūs požymiai, lemiantys bendrą automobilių kelio dangos konstrukcijos eksploatavimą.

Apibendrinant galima teigti, kad žemės sankasa – tai automobilių kelio dangos pagrindas. Nuo jos įrengimo technologijos priklauso klojamo kelio eksploatacinės savybės. Žemės sankasos įrengimą paprastai sudaro keturi etapai: paruošiamieji darbai, pylimas/iškasa, drenažas, apsauga. Sankasos įrengimui, priklausomai nuo klojamo kelio tipo, grunto kokybės ir kitų reikšmingų veiksnių, naudojamos įvairios medžiagos.

1.2. Automobilių kelių žemės sankasos įrengimo technologijų tyrimų būtinumas

Automobilių kelio dangos dinaminės reakcijos, veikiamos eismo apkrovų, plačiai nagrinėjamos civilinėje inžinerijoje. Dauguma pasaulio greitkelių tiesiami naudojant asfalto sluoksnį, kuris paprastai klojamas ant žemės sankasos, sudarytos iš dviejų ar daugiau skirtingų medžiagų sluoksnių. Transporto priemonių judėjimas per automobilių kelio dangą gali sukelti jos vibraciją ir deformaciją, todėl prireiks brangiai kainuojančios techninės priežiūros, be to sutrumpėja greitkelių tarnavimo laikas. Todėl, anot Zhao ir kt. [30], svarbu tiksliai numatyti žemės sankasos dinaminį atsaką atsižvelgiant į transporto priemonių ir kelio dangos sąveiką [30].

Cygo ir kt. [16] teigimu, spartus intensyvaus eismo automobilių keliuose (ypač magistraliniuose keliuose) augimas, standartinės ašies apkrovos padidėjimas nuo 10 iki 11,5 t, automobilių kelio dangos deformacijos (pav., provėžos), priešlaikinis automobilių kelių dangos susidėvėjimas ir kiti defektai (įtrūkimai, duobės ir pan.) skatina mokslininkus ieškoti naujų automobilių kelio dangos įrengimo gerinimo metodų [16]. Vienas iš tokių metodų – naujų, geresnių žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimo būdų paieškos, įtraukiant į šį procesą daugiakriterį vertinimą. Be to, Abija [15] pastebėjimu, bet kurios konstrukcijos stabilumas priklauso nuo medžiagos sudėties, o tiesiamų automobilių kelių stabilumą, t.y. automobilių kelio dangos stabilumą, eksploatacines savybes ir ilgaamžiškumą kontroliuoja įrengiamos žemės sankasos stiprumas, prisotinimo laipsnis ir numatomas elgesys esant prisotintoms sąlygoms [15].

Amakye ir kt. [2] teigimu, tiesiant kelius, didžioji visų statybos išlaidų dalis tenka automobilių kelio žemės sankasos įrengimui, ypač tais atvejais, kai statybų vietoje yra silpnas arba ekspansyvus gruntas. Žemės sankasos CBR vertė gali turėti įtakos bendram automobilių kelio dangos konstrukcijos storiui ir gyliui, o tai gali labai paveikti kelio dangos statybos sąnaudas. Kalifornijos laikomosios gebos rodiklis (CBR) – tai skvarbos bandymas, skirtas žemės sankasos stiprumui įvertinti, siekiant nustatyti jos laikomąją galią. Kai žemės sankasos įrengimo vietoje dirvožemiai pasižymi akivaizdžiais tūrio pokyčiais, galinčiais išsipūsti ir susitraukti kintant drėgmės kiekiui dėl esančių mineralų, jie vadinami ekspansyviu gruntu. Tokio tipo gruntas nėra pajėgus išlaikyti automobilių kelio dangos svorį ir eismo apkrovą, todėl paprastai jis turi būti modifikuotas arba pertvarkytas, kad būtų padidintas jo pajėgumas išlaikyti apkrovą. Mokslininkai tyrime *automobilių kelio dangos storio ir konstrukcijos gylio optimizavimas naudojant apdorotas ir neapdorotas dirbtinai susintetintas ekspansyvias žemės sankasos medžiagas, kurių plastiškumo indeksas skiriasi* [2] analizavo žemės sankasos įrengimo technologijas, siekiant determinuoti apdorotų ir neapdorotų ekspansyvių automobilių kelių pagrindo medžiagų poveikį ir kaip jos veikia CBR vertes bei žemės sankasos storį naudojant cheminio stabilizavimo metodus. Cheminis žemės sankasos stabilizavimas yra veiksmingas metodas, skirtas pagerinti ekspansyvų pagrindą. Jį sudaro įvairių rūšių priemaišų, pavyzdžiui, kalkių ir cemento, kaip rišamųjų medžiagų, pridėjimas gruntui stabilizuoti. Manoma, kad cheminio grunto stabilizavimo būdai buvo naudojami sprendžiant problemas, susijusias su išsiplėtusiais gruntais. Pridėjus šių cheminių rišamųjų medžiagų, keičiasi dirvožemio dalelių gradacija ir fizikinė sintezė dirvožemio dalelėse ir aplink jas, skatinama katjonų apykaita, dėl to vyksta ekspansyvaus dirvožemio dalelių flokuliacija ir aglomeracija [2]. Savo tyrime Amakye ir kt. [2] naudojo dirbtinai susintetintos grunto pagrindo medžiagas – neapdorotų bentonito ir kaolininio molio mišinį. Šių mišinių skirtingas procentinis santykis sudaro grunto pagrindo medžiagas, kurių savybės yra panašios į natūraliai egzistuojančio ekspansyvaus molio grunto savybes. Sutankinimo elgsenos bandymas atliktas neapdorotam bentonito ir kaolininio molio gruntui prieš juos sumaišant, siekiant nustatyti jų elgseną, savybes ir stiprumą esant skirtingam drėgnumui. Vėliau dirbtinai susintetintas gruntas buvo apdorotas naudojant cementą ir kalkes, kad būtų padidintas jo stiprumas ir jis galėtų būti naudojamas kaip žemės sankasos medžiaga automobilių kelių statybai. Siekiant nustatyti neapdoroto ir apdoroto dirbtinai susintetinto grunto stiprumą ir laikomąją galią tam, kad jį būtų galima naudoti kaip žemės sankasos medžiagą, atliktas Kalifornijos laikomosios gebos rodiklio (CBR) bandymas. Tyrimo rezultatai atskleidė, kad didėjant CBR vertei mažėja žemės sankasos storis ir bendras automobilių kelio konstrukcijos gylis. Visų apdorotų bandinių CBR vertės buvo didesnės nei 2 proc., todėl juos galima naudoti automobilių kelių tiesimui. Apdoroto ekspansinio pagrindo išbrinkimo potencialas sumažėjo iki 0,04 % Tyrimo išvadose teigiama, kad žemės sankasos storį ir bendros automobilių kelio

konstrukcijos gylį galima sumažinti stiprinant žemės sankasos medžiagas ir naudojant cementą bei kalkes kaip rišamąsias medžiagas.

Zhang'as [8] atkreipia dėmesį, kad žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimas turi būti atliekamas tiek automobilių kelių projektavimo etape, tiek įrengimo proceso metu. Mokslininkas siūlo vadovautis daugiakriterių metodų galimybėmis. Vertinimas, anot jo, turėtų būti pagrįstas projektiniais brėžiniais, o svarbiausi duomenys – išskirti ir atitinkamai įvertinti. Tikslus ir išsamus žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimas naudingas atkuriant ir sureguliuojant automobilių kelio vidurio liniją. Atlikus visus būtinus išmatavimus, visiškai pažymimi automobilių kelio žemės sankasos įrengimo kontūrai, koordinatės ir dydis, randama tiksli padėtis, kuri palengvina visus kitus automobilių kelio įrengimo darbus. Kitaip tariant, reikia pabrėžtinai kruopščiai išmatuoti žemės sankasos išlyginimo taškus, ašines linijas ir skersines linijas tam, kad būtų užtikrintas vėlesnių statybų tikslumas ir veiksmingumas. Tuomet geodezininkai turi suvokti keletą esminių reikalavimų:

- pirma, jie turėtų būti susipažinę su brėžinių projektavimo idėja, visiškai suvokti brėžinių turinį ir atlikti matavimus remdamiesi brėžinių turiniu;
- antra, jie turėtų numatyti visas operacijas griežtai laikydamiesi reikalavimų ir brėžinių, kad užtikrintų atitikimą brėžinių projektui;
- trečia, būtina ieškoti galimų neatitikimų ir atlikti išsamų patikrinimą, kad būtų garantuotas duomenų tikslumas [8].

Be to, žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimo metu, atsižvelgiant į inžinerinės statybos poreikius, reikėtų nustatyti laikinus niveliavimo taškus ir žemės paviršiaus aukštį, kad būtų galima pakartotinai išmatuoti ašinę liniją, su tikslu nustatyti skerspjūvio padėtį ir užtikrinti, kad skerspjūvio padėtis atitiktų statybos reikalavimus. Tokiu būdu matavimas, padėties nustatymas ir galutinis vertinimas gali būti laikomi pakankamai tiksliais.

Arshad'o, ir kt. [29] teigimu, granuliuotus žemės sankasos užpildus sudaro patvarios skaldyto akmens arba žvyro dalelės, galinčios atlaikyti tvarkymo, barstymo ir tankinimo poveikį, nesusidarant kenksmingoms smulkioms dalelėms [18]. Todėl, Zhang'o ir kt. [5] pastebėjimu, žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimas turi prasidėti nuo bandomosios žemės sankasos atkarpos įrengimo.

Kaip buvo išsiaiškinta anksčiau, žemės sankasos elementai – tai natūralaus grunto pagrindo sluoksnis, kurį dengia ant viršaus uždėti apdorotų medžiagų sluoksniai. Pagrindinė grunto pagrindo funkcija - paskirstyti transporto priemonių apkrovas. Atitinkamai žemės sankasos stiprumą ir patvarumą, anot Kamal'o ir Bas'o [7], galima padidinti gerinant grunto, pagrindo sluoksnių ir paviršiaus sluoksnių medžiagas. Tokių medžiagų naudojimas yra aktualus ir nuolat atliekamų mokslinių tyrimų, skirtų žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimui, tema. Vertinant žemės sankasos įrengimo technologiją būtina atsižvelgti į tai, kuri danga bus naudojama automobilių kelio tiesimui. Šiuolaikinės automobilių kelio dangos sąlyginai skirstomos į lanksčiąsias ir standžiąsias dangas [7]. Šios dvi rūšys dar skirstomos į porūšius (žr. 3 lentelę).

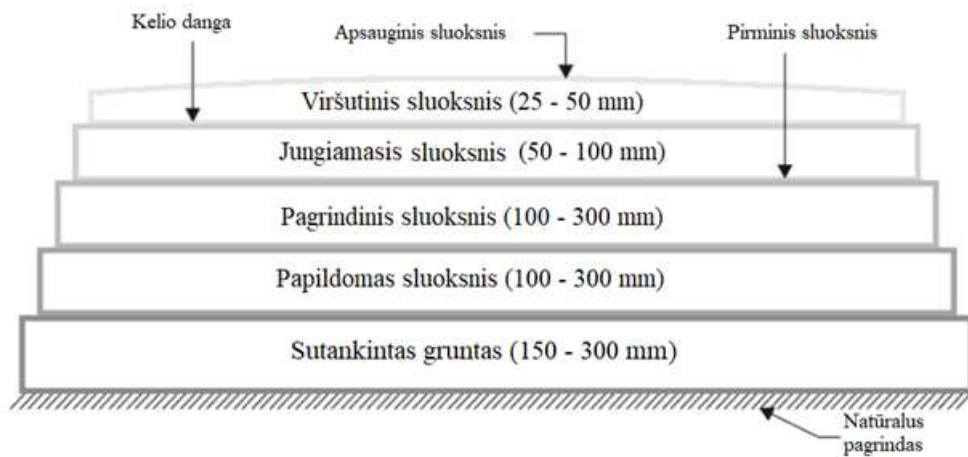
3 lentelė. Automobilių kelio dangų skirstymas [31]

Rūšis	Porūšis
Lanksčiosios (nestandžiosios) automobilių kelio dangos (asfalto, akmenuota)	Įprastinė sluoksniuota lanksčioji automobilių kelio danga
	Viso gylio asfalto automobilių kelio danga
	Akmenų pagrindą turinti lanksčioji automobilių kelio danga
Standžiosios automobilių kelio dangos (betono, asfaltbetonio, grindinio automobilių kelio)	Sujungta paprasto betono automobilių kelio danga
	Sujungta gelžbetoninė automobilių kelio danga
	Ištisinė gelžbetonio automobilių kelio danga
	Iš anksto įtempto betono automobilių kelio danga

Standžiosioms kelio dangoms paprastai naudojamas betonas kaip pagrindinis konstrukcinis elementas. Priklausomai nuo sąlygų, inžinieriai gali projektuoti automobilių kelio dangos plokštę iš paprasto, lengvai armuoto, ištisai armuoto, iš anksto įtempto ar pluoštinio betono. Užpildo tipas gali turėti lemiamos įtakos kelio dangos eksploatacinėms savybėms ir ilgaamžiškumui. Kai naudojamos sveikos medžiagos, iš susmulkintų uolienu užpildų gaunamas betonas, kurio lenkimo stipris yra didesnis nei nesusmulkintų užpildų, skirtų panašioms mišiniam. Be to, cemento stiprumas turi didelę įtaką betoninių dangų gniuždymo ir lenkimo stipriui, t. y. esant vienodam vandens ir cemento santykiui, didesnio gniuždymo ir lenkimo stiprio betonas gaunamas tada, kai mišinys sudarytas iš didesnio stiprumo cemento [7]. Atkreiptinas dėmesys, kad Abija teigimu, žemės sankasos stiprumas ir eismo apkrova yra svarbiausi faktoriai renkantis standžią ar lanksčią automobilių kelio dangos konstrukciją [15].

Kaip pastebi Adacha [25], automobilių kelių dangos, nepriklausomai nuo to, ar jos yra standžios, ar lanksčios, tiesiamos ant žemės sankasos, kuri užtikrina gerą atramą, apriboja automobilių kelio dangos deformacijas iki priimtinių normų, sumažina diferencinį judėjimą dėl šalčio, susitraukimo ir/arba dirvožemio brinkimo bei užtikrina automobilių kelio dangos vientisumą [25].

Įrenginėjant sankasą lanksčiajai automobilių kelio dangai būtina turėti omenyje, kad tokio tipo dangos dažniausiai naudojamos mažo ir vidutinio eismo intensyvumo keliuose, tačiau nemažai jų naudojama ir didelio eismo intensyvumo tarpžemyniniuose greitkeluose bei oro uostų kilimo ir tūpimo takuose bei riedėjimo takuose, kuriuos veikia didelės orlaivių apkrovos. Didėjant apkrovų poreikiui ir apkrovų skaičiui, tampa labai svarbu tinkamai įvertinti lanksčios automobilių kelio dangos žemės sankasos įrengimo technologiją, apibūdinant žemės sankasos gruntų ir nesurištų užpildų sluoksnių elgseną. Lanksčiosios automobilių kelio dangos perduoda ratų apkrovos įtempius žemesniems sluoksniams, perduodant juos iš grūdelio į grūdėlį per granulimetrinės struktūros sąlyčio taškus. Dėl to rato apkrova, veikianti dangą, pasiskirsto didesniame plote, o įtempiai mažėja didėjant sankasos gyliui. Taikant šią įtempių pasiskirstymo savybę lanksčiųjų automobilių kelio dangų žemės sankasos paprastai turi daug sluoksnių (žr. 5 pav.).



5 pav. Lanksčiosios automobilių kelio dangos žemės sankasos sluoksniai [32]

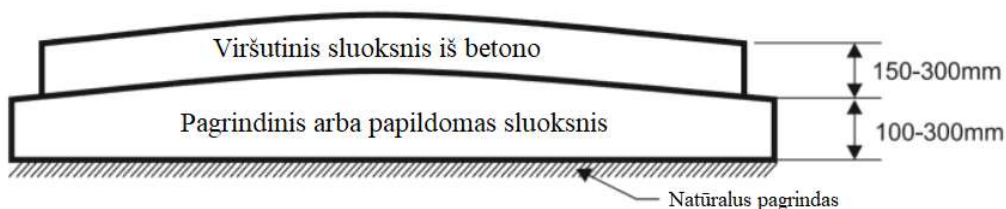
Kaip matyti iš 5 paveikslo, projektuojant lanksčiąją automobilių kelio dangą naudojama sluoksniuotos žemės sankasos sąvoka. Lanksčiosios dangos paprastai kenčia nuo provėžų, atsirandančių dėl intensyvaus eismo ir sudėtingų aplinkos sąlygų. Todėl įrenginėjant sankasą tokioms automobilių kelio dangoms, būtinas jos įrengimo technologijų vertinimas. Adacha [25] akcentuoja, jog lanksčiosios automobilių kelio dangos žemės sankasos sluoksnių stiprumas ir storis turi būti pakankamai didelis, siekiant atlaikyti numatomą apkrovą be pažeidimų kiek įmanoma ilgiau. Projektuotojas negali pakeisti natūralaus pagrindo ir yra priverstas projektuoti pagal vietoje esančias grunto sąlygas. Tačiau žemės sankasos sluoksnių medžiagos gali būti parinktos tokios, kad jų stipris būtų pakankamas eismo apkrovoms atlaikyti ir kad jos būtų vienodos ir pastovios kokybės, kad galėtų lengvai pasklisti ir sutankėti [25]. Žemės sankasos sluoksniai taip pat turi būti apsaugoti nuo lietaus, šalčio, aukštos temperatūros ir kito aplinkos poveikio arba būti pakankamai patvarūs, kad atlaikytų aplinkos poveikį ir nepatirtų pažeidimų, kurie gali atsirasti dėl griovimo ar kitų netolygių deformacijų, hidrauliškai surišėtų mišinių įtrūkimų bei kitų medžiagų degradacijos formų. Taip pat labai svarbu, kad pakartotinai veikiant eismo apkrovai, sankasoje nesusikauptų pernelyg didelės deformacijos, nes tai yra potencialus išdaužų automobilių kelio dangoje šaltinis [12]. Taigi galima teigti, kad lanksčiosios automobilių kelio dangos eksploatacinės savybės, be kitų veiksnių, pavyzdžiui, statybos metodų, aplinkos, priežiūros ir atstatymo, iš esmės susijusios su ją sudarančių žemės sankasos medžiagų sluoksniais.

Jaffar'o ir kt. [27] pastebėjimu, automobilių kelio danga ir sankasa – tai pagrindiniai konstrukciniai elementai, nuo kurių priklauso įrenginėjamo automobilio automobilių kelio tvirtumas ir eksploataavimo trukmė. Tipišką lanksčiąją dangą sudaro automobilių kelių medžiagų sluoksniai. Per šią daugiasluoksnią sistemą apkrova perkeliama į natūralaus pagrindo sluoksnį. Šis natūralaus pagrindo sluoksnis veikia kaip žemės sankasos pagrindas. Minėti mokslininkai žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimo būtinumą sieja su aplinkos tvarumo realizavimo klausimais. Jaffar'o ir kt. [27] teigimu, aplinkos tvarumas apibrėžiamas kaip antrinių išteklių naudojimas šiuolaikiniams poreikiams tenkinti, nemažinant ateinančios kartos poreikių. Visame pasaulyje šios tendencijos realizavimas tapo nauja tūkstantmečio vystymosi tikslų sąvoka. Todėl mokslininkai iš skirtingų šalių stengiasi iširti įvairius šiuolaikinius metodus aplinkos tvarumui užtikrinti. Atliekų susidarymas ir išteklių išekvojimas kelia vis didesnę susirūpinimą visame pasaulyje. Automobilių kelių dangos, tame tarpe ir žemės sankasos, įrengimas atlieka labai svarbų vaidmenį siekiant aplinkos tvarumo [27]. Kaip matyti, pasaulyje pastebimos naujausios tendencijos, siūlančios naudoti atliekas taip, kad būtų pagerintos skurdžių dirvožemių inžinerinės savybės. Pagrindinis šią tendenciją lemiantis veiksnys –

didžiuliai atliekų kiekiai, pavyzdžiui, marmuro, kalkių ir daugelio kitų pramonės ir žemės ūkio atliekų. Šios atliekos kelia pavojų aplinkai ir išsekvoja sąvartynų plotus. Todėl, anot mokslininkų, norint išspręsti aplinkosaugos problemas, vienas iš geriausiai veikiančių sprendimų yra šių atliekų panaudojimas statybvietėse, daugiausia – žemės sankasos įrengimo projektuose. Pastebėta, kad siekiant stabilizuoti silpną dirvožemį, dauguma atliekų veikia kaip stabilizatoriai, kurie duoda geresnių rezultatų:

- atliekos gali būti panaudotos kaip geras ekonominis variantas civilinės inžinerijos projektuose silpnam gruntui stabilizuoti;
- kietosios atliekos, kuriose yra aliumosilikatų, didina minkšto grunto stiprumą ir mechanines savybes;
- dirvožemio stabilizavimas naudojant sudėtines medžiagas gali būti geresnė alternatyva ekonominiu požiūriu;
- sauso grunto tankis, brinkimo slėgis ir brinkimo potencialas gerokai sumažės pridėjus padangų gumos atliekų ir cemento;
- dirvožemio stabilizavimui naudojant cementą paprastai neteikiama pirmenybė dėl pernelyg didelių išlaidų ir aplinkosaugos problemų;
- marmuro dulkės pasiūlytos kaip geras pasirinkimas automobilių kelio dangos sankasos gruntui pagerinti;
- ryžių lukštų pelenai, cukranendrių išspaudų pelenai ir karvių mėšlo pelenai naudojami kaimo automobilių kelių natūraliam gruntui stabilizuoti;
- nano druska suteikia didesnę patvarumą ir stiprumą, palyginti su kalkėmis stabilizuotu gruntu [27].

Įrenginėjant sankasą standžiajai automobilių kelio dangai būtina turėti omenyje, kad tokios rūšies automobilių kelio dangos paprastai tiesiogiai remiamos į gruntą arba turi vieną žemės sankasos sluoksnį (žr. 6 pav.).



6 pav. Standžiosios automobilių kelio dangos žemės sankasos sluoksniai [32]

Purnawan‘as ir Utami [33] vertino standžiosios automobilių kelio dangos žemės sankasos įrengimo technologiją. Minėti mokslininkai pateikia standžios automobilių kelio dangos stiprumo palyginimą, naudojant skirtingus penkis žemės sankasos sluoksnius. Eksperimentas atliktas konstrukcijų ir medžiagų laboratorijoje, betono dangos pavyzdžiai naudojami betono kubo pavidalu, kuris buvo padėtas ant skirtingų žemės sankasų. Pirmasis bandinys – betono kubas, padėtas tiesiai ant natūralaus pagrindo, antrasis – ant granuliuoto pagrindo sluoksnio, trečiasis – ant granuliuoto pagrindo sluoksnio su gruntiniu sluoksniu, ketvirtasis – ant lieso betono, o penktasis – ant lieso betono, kuris atskirtas naudojant nepralaidžią membraną. Standžiosios automobilių kelio dangos stiprumą parodė betono gniuždymo stiprio reikšmės. Mokslininkai nustatė, kad betono bandinys, padėtas ant lieso betono pagrindo, naudojant nepralaidžią membraną, pasižymi didžiausiu stipriu, palyginti su kitu betonu ant kitos pagrindo sluoksnio medžiagos. Nelaidžios membranos naudojimas ant lieso betono yra galimas

veiksny, dėl kurio gniuždymo stipris gali būti didžiausias. Ši membrana sulaukėtų cemento vandenį betono mišinyje, todėl betono stipris vis dar būtų didelis [33].

Apibendrinant galima teigti, kad siekiant užtikrinti geras klojamo automobilio kelio eksploatacines savybes, būtina atlikti žemės sankasos įrengimo technologijos tyrimus. Kai kurie mokslininkai teigia, kad šiuos tyrimus būtina atlikinėti visos sankasos įrengimo metu. Priklausomai nuo klojamo kelio dangos rūšies, žemės sankasa gali turėti nuo dviejų iki penkių sluoksnių. Jų įrengimui bei vertinimui naudojama skirtinga technika ir metodai, apie kuriuos rašoma sekančiame skyriuje.

1.3. Žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimo įranga ir metodai

Mokwa ir Akin'as [34] žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimą skirsto į laboratorinį vertinimą ir vertinimą vietoje (žr. 4 lentelę).

4 lentelė. Žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimo metodai [34]

Metodas	Būdas
Laboratorinis vertinimas	R-vertės nustatymas. Žemės sankasos dirvožemio pasipriešinimo vertė (R vertė) nustatoma stabilometriniame įrenginyje, nustačius eksudacijos slėgį. Dirvožemio bandiniai paruošiami minkymo tankintuve esant skirtingam beveik prisotinto vandens kiekiui, dedami į eksudacijos indikatorius įrenginį ir matuojamas slėgis į kvadratinį colį (<i>angl.</i> PSI - Pounds per Square Inch). Užregistravus eksudacijos slėgį, apkrova sustabdoma, kad dirvožemis atsistatytų. Tuomet dirvožemis dedamas į stabilizatorių ir sukliamas 5 psi horizontalusis slėgis. Vertikaliaji apkrova, kurios poslinkis kontroliuojamas, veikiama 0,05 colio per minutę greičiu, kol apkrova pasiekia normą. Horizontalusis slėgis registruojamas prieš vertikaliąją apkrovą sumažinant iki minimumo, o horizontalųjį slėgį sumažinant iki 5 psi. Galiausiai nustatomas kalibruotos rankenos apsisukimų skaičius (vadinamas apsisukimų poslinkiu), kurio reikia horizontaliajam slėgiui padidinti nuo 5 iki 100 psi. R vertė apskaičiuojama pagal posūkių poslinkį ir horizontalųjį slėgį, atitinkantį minimalią vertikaliąją apkrovą. Apskaičiuotoji R vertė gali būti nuo 0 iki 100.
	Kalifornijos laikomosios gebos rodiklio (CBR) nustatymas. Kalifornijos laikomosios gebos nustatymas vyksta su pertvarkytais žemės sankasos dirvožemio mėginiais apkrovos rėmelyje, kuriame penkių cm skersmens stūmoklis pastoviu 1,5 cm per minutę greičiu įstumiamas į dirvožemio paviršių. Apkrova, susijusi su 2,5 ir 5 cm dirvožemio poslinkiu, lyginama su „standartine“ 1 000 ir 1 500 psi apkrova smulkintai užpildinei medžiagai. Cilindriniai 15 cm skersmens, 12 cm aukščio dirvožemio mėginiai paruošiami 18 cm aukščio formoje. Dėl papildomo aukščio atsiranda vietos papildomiems svoriams, kurie atspindi ant viršaus esančios automobilių kelio dangos dalies sukliamą perkrovos slėgį.
	Pakartotinės apkrovos triašio slėgio bandymas. Pakartotinės apkrovos triašis bandymas (RLT) gali būti atliekamas su pertvarkytais arba nepažeistais lauko bandiniais. Bandymas atliekamas su bandiniais triašėje kameroje ir atliekamas esant įvairiems ribojančio slėgio (σ_3) ir įvairiems kartotinių nuokrypių įtempių (σ_d) lygiams. Deviatorinis įtempis (σ_d) yra skirtumas tarp bendrojo ašinio įtempio (σ_1) ir ribinio slėgio (σ_3). Šis bandymas buvo sukurtas taip, kad geriau imituotų automobilių eismo sukliamas apkrovas ir rodytų realesnę situaciją, negu R vertės ar CBR bandymai.
Vertinimas vietoje	Krintančio svorio deflektometras (FWD) ir nešiojamasis krintančio svorio deflektometras (P-FWD). Šie prietaisai gali būti naudojami žemės sankasos sluoksnių moduliams nustatyti, sukliant impulsinę apkrovą paviršiui ir geofonais matuojant deformacijas. Moduliai nustatomi naudojant specialias kompiuterines programas.
	Dinaminis kūginis penetrometras (DCP). Dinaminio kūginio penetrometro (DCP) prietaisą sudaro cilindrinis strypas su kūginiu antgaliu, kuris į

Metodas	Būdas
	dirvožemį įsminga pakartotinai paleidžiant 17,6 arba 10,1 kg svorį iš 57 cm aukščio. Kūgio antgalis yra 60° kampu ir turi 2 cm skersmens pagrindą. Gali būti naudojami vienkartiniai antgaliai, kurių antgalis ištraukus strypą lieka dirvožemyje. Suminis skverbimasis matuojamas ir registruojamas kartu su smūgių skaičiumi. Minkštuose dirvožemiuose skverbties rodmenys paprastai matuojami po kiekvieno smūgio, o standesniuose dirvožemiuose - kas 5 ar 10 smūgių.
	Plokščiojo dilatometro bandymas (DMT). Atliekant dilatometro bandymą įvertinamas šoninis <i>in situ</i> modulis. Gręžimo įrenginys arba kita lauko įranga, aprūpinta hidrauliniu presu, naudojama plokščiam plieniniam peiliukui į dirvožemį įstumti. Pasirinktame gylyje plona apskrita plieninė membrana, esanti vienoje ašmenų pusėje, išplečiama suslėgtomis dujomis. Žvyras ar prietaisai gali pažeisti jautrią membraną, todėl DMT pirmiausia naudojamas smėliams ir smulkiagrūdžiams dirvožemiams tirti.
	Mechaninio kūgio prasiskverbimo bandymas (CPT). Atliekant kūginio prasiskverbimo bandymą, kūgis su prietaisais įstumiamas į dirvožemį ir elektroniniu būdu fiksuojami kūgio antgalio pasipriešinimo, rankovės trinties ir kartais porų slėgio matavimai. CPT suteikia naudingos geotechninės ir geoaplinkos informacijos apie dirvožemį ir požeminį vandenį gylyje. Tačiau šis prietaisas dažniausiai nenaudojamas savybėms labai mažame gylyje (mažesniame nei 0,5 m gylyje) nustatyti, nes netoli žemės paviršiaus esantis ribinis slėgis yra santykinai mažas, palyginti su kūgio dydžiu.

Ketvirtoje lentelėje pateikiama informacija apie laboratorinius ir lauko bandymus, kurie gali būti naudojami žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimui atlikti. Visi lentelėje aprašyti metodai vienu ar kitu metu buvo naudojami tiek mokslinių tyrimų, tiek projektavimo tikslais.

Modeer'io [11] pastebėjimu, įrengta žemės sankasa gali būti testuojama mechaniniu būdu vietoje (žr. 7 pav.).



a) žemės sankasos laikomosios galios vertinimas atliekant plokščių statinės apkrovos bandymą



b) žemės sankasos laikomosios galios vertinimas atliekant bandymą krintančio svorio deflektometru

7 pav. Žemės sankasos laikomosios galios vertinimas [5]

Žemės sankasos laikomosios galios vertinimas, anot Arshad'o ir kt. [29], leidžia nustatyti, ar pasiektas reikiamas projektinis stipris. Mokslininkai tyrime *palyginamasis žemės sankasos laikomosios galios įvertinimas atliekant laboratorinius bandymus ir bandymus vietoje* išsamiai aprašė žemės sankasos laikomosios galios vertinimo tyrimus, atliktus naudojant trijų tipų įrangą šešiose 150 m ilgio žemės sankasos bandomosiose atkarpose Malaizijos centriniam pusiasalio regione. Tyrimuose buvo naudojama įvairi įranga: Kalifornijos laikomosios gebos rodiklio (CBR) įranga, dinaminis kūginis penetrometras (DCP) ir nešiojamasis krintančio svorio deflektometras (P-FWD). Šiais prietaisais bandymai atlikti nustatytais atstumais bandomuosiuose ruožuose, siekiant nustatyti žemės sankasos CBR, DCP skvarbos koeficientą ir P-FWD tamprumo modulio vertes. Vėliau gauti lauko tyrimų

rezultatai buvo palyginti ir išanalizuoti su laboratorijoje gautomis neįmirkusio ir įmirkusio grunto CBR vertėmis. Buvo sukurti koreliacijos modeliai, skirti lauko ir laboratorijoje gautoms vertėms susieti. Moksliskai nustatyta, kad tarp CBR vietoje ir laboratorinių nemirkytų CBR verčių yra tinkamas ryšys. Taip pat gauta teigiama koreliacija tarp DCP įsiskverbimo greičio ir CBR. Vadovaujantis gautais rezultatais Arshad'as ir kt. [29] teigia, jog DCP duoda pagrįstus rezultatus ir yra ekonomiškiausia įranga žemės sankasos laikomosios galios stiprumui įvertinti [34].

Apie žemės sankasos laikomosios galios įvertinimą atliekant bandymus vietoje rašo ir Singh'as, ir kt. [35]. Mokslininkų teigimu, daugelyje šalių, įskaitant Indiją, žemės sankasos projektuojamos remiantis laboratoriniu Kalifornijos laikomosios gebos santykio bandymu (CBR). CBR bandymas – tai paprastas stiprumo bandymas, kurio metu medžiagos laikomoji geba lyginama su gerai išrūšiuotos skaldos laikomąja geba, taigi aukštos kokybės skaldos CBR turėtų būti 100 % (žr. 8 pav.).



8 pav. Laikomiosios gebos Kalifornijos rodiklio nustatymas žemės sankasos įrengimo vietoje [18]

Statybos metu, norint įsitikinti, ar laikomasi projektinių nuostatų, reikia patikrinti CBR žemės sankasos įrengimo vietoje. CBR tikrinimui imami nepažeisti mėginiai, kurie vėliau tikrinami laboratorijoje. Paimti nepažeistą mėginį iš žemės sankasos pagrindo, kuris iš esmės nėra plastiškas, beveik neįmanoma, be to, CBR nustatymas užima daug laiko ir priklauso nuo daugelio parametrų, tokių kaip grunto santykinis tankis, dalelių dydis, tekstūra, drėgmės kiekis, suspaudimo slėgis ir kt. Todėl darbų vykdymo etape tampa labai sunku nustatyti, ar projektinė nuostata buvo pasiekta, ar ne. Minėti mokslininkai įvertino žemės sankasos laikomąją galią atliekant bandymus vietoje, kurių metu naudojo dinaminį kūginį penetrometrą (DCP) ir šviesos deflektometrą (LWD) įvairiose žemės sankasos vietose ant Sirhindo kanalo kranto, Pandžabe, Indijoje. Sankasa buvo vertinama penkiolikoje skirtingų vietų. Nustatyta, kad DCP ir LWD modeliai su kitomis indekso savybėmis labiau tinka svarbiems automobilių kelio darbams. Tuo tarpu paprastas tankio nustatymas nėra patikimas metodas žemės sankasos stiprumui vietoje nustatyti. Modeliai pasirodė esantys veiksminga ir vertinga pagalbinė priemonė atliekant sutankinto grunto sluoksnių bandymus žemės sankasos įrengimo vietoje [35].

Schaefer'as, ir kt. [12] nurodo tokias papildomo ir sutankinto grunto žemės sankasos sluoksnių santykinės CBR vertes (žr. 5 lentelę).

5 lentelė. Pagrindinio ir papildomo žemės sankasos sluoksnio gruntų santykinės CBR vertės [18]

CBR, proc.	Sluoksnis	Įvertinimas
Daugiau, kaip 80 %	Papildomas sluoksnis	Puikiai
50 – 80 %	Papildomas sluoksnis	Labai gerai
30 – 50 %	Papildomas sluoksnis	Gerai
20 – 30 %	Sutankinto grunto sluoksnis	Labai gerai
10 – 20 %	Sutankinto grunto sluoksnis	Gana gerai
5 – 10 %	Sutankinto grunto sluoksnis	Prastai
Mažiau, nei 10 %	Sutankinto grunto sluoksnis	Labai blogai

Kaip matyti iš 5 lentelės, kuo didesnė sutankinto grunto CBR vertė, tuo didesnio stiprumo automobilių kelio dangą jis gali išlaikyti. Atkreiptinas dėmesys, kad automobilių kelio dangos storio pokytis, reikalingas tam tikrai eismo apkrovai išlaikyti, nėra tiesiogiai proporcingas papildomo sluoksnio grunto CBR vertės pokyčiui. Pavyzdžiui, CBR pokyčiui vienu vienetu nuo 5 iki 4 reikia didesnio automobilių kelio dangos storio nei CBR pokyčiui vienu vienetu nuo 10 iki 9 [18].

Dar vienas žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimo metodas – atsistatymo modulio (M_r) apskaičiavimas. Rahman'as ir kt. [36] pastebi, kad atsistatymo modulis (M_r) yra pagrindinė medžiagos savybė, naudojama žemės sankasos sluoksniams apibūdinti. Tai medžiagos standumo matas, kuriuo remiantis galima analizuoti medžiagų standumą įvairiomis sąlygomis, pavyzdžiui, esant drėgmei, tankiui ir įtempių lygiui. Tai taip pat yra būtinas mechaninio – empirinio automobilių kelio dangos projektavimo metodo įvesties parametras [36]. Atsistatymo modulis paprastai nustatomas atliekant laboratorinius bandymus, matuojant cilindrinio bandinio, veikiamo ciklinės ašies apkrovos, standumą. M_r apibrėžiamas kaip taikomo ašies nuokrypio įtempio ir ašies atkuriamosios deformacijos santykis (žr. 9 pav.).



9 pav. Atsistatymo modulio (M_r) nustatymas laboratorijos sąlygomis [29]

Dar vienas automobilių kelių žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimo būdas – žemės sankasos tamprumo modulio (K , K_s) nustatymas. Tai žemės sankasos laikomosios galios bandymas.

Šio metodo pagalba žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimo K vertė apibrėžiama kaip žemės sankasos reakcija, tenkanti deformacijos ploto vienetai, ir paprastai nurodoma psi colyje. Naeni ir kt. [24] atkreipia dėmesį, kad vienas iš svarbiausių automobilių kelio žemės sankasos įrengimo uždavinių – įvertinti su automobilių kelio dangą besiliečiančio grunto reakciją. Inžineriniame statinių projektavime grunto reakciją galima modeliuoti daug paprastesne sistema, vadinama žemės sankasos reakcijos modeliu. Minėti mokslininkai straipsnyje „Molio dirvožemio grunto reakcijos modulis (K_s), pagrįstas lauko bandymais“ aprašė modelį, pagal kurį daroma prielaida, kad grunto standumas, kuris laikomas sąlyčio slėgių ($\Delta\sigma$) ir susijusio vertikalios poslinkio ($\Delta\delta$) santykiu, yra tiesinis ir gali būti išreikštas žemės sankasos reakcijos koeficientu K_s . Dažniausiai žemės sankasos reakcijos modulio (K) vertė naudojama projektuojant standžiosios automobilių kelio dangos, klojamos ant įrengtos žemės sankasos, storį. Tuo tarpu sudėtinis žemės sankasos reakcijos modulis (K_s) naudojamas tam, kad nustatyti žemės sankasos stiprį, pakoreguotą atsižvelgiant į papildomą žemės sankasos teikiamą atramą [24].

Ahmed'as ir kt. [37] tyrime *lanksčios dangos projektavimo trukmės pagrindinio sluoksnio veiksmingumo įvertinimas* nustatė, kad pastaraisiais metais buvo padidintos didžiausios leistinos bendrosios transporto priemonių masės ir ašių apkrovos. Tai padidino leistiną bendrąją masę ir daugiau nei proporcingai padidino automobilių kelio dangos aplinkos būklės pablogėjimą. Todėl minėti mokslininkai, taikant mechaninį-empirinį projektavimo metodą, apskaičiavo reikiamą žemės sankasos gylį tam tikroms projektavimo sąlygoms, derindami kompiuterinio modeliavimo ir eksploatacinių savybių modelių elementų vertinimą. Vadovaudamiesi savo atliktais bandymais, mokslininkai aprašo žemės sankasos eksploatacinių savybių vertinimą pagal projekcinį tarnavimo laiką. Tyrimo metu, naudojant KENPAVE programinę įrangą, mokslininkai tyrė žemės sankasos sluoksnių gylio, tamprumo modulio (K_s) ir apkrovos pakartojimų skaičiaus kitimo poveikį lanksčiojo automobilių kelio dangos žemės sankasos projekciniam tarnavimo laikui. Nustatyta, kad, didėjant žemės sankasos sluoksnio storiui, didėja projekcinio tarnavimo laiko procentinė dalis, o didėjant žemės sankasos sluoksnio storiui bei žemės sankasos tamprumo moduliui, taip pat didėja projekcinio tarnavimo laiko procentinė dalis, tačiau pakartotinė apkrova neturi įtakos procentinei daliai, kuria didėja projekcinio tarnavimo laiko procentinė dalis, kai didėja žemės sankasos sluoksnio storis ir tamprumo modulis [37].

Khazanovich'ius ir kt. [38] taip pat siūlo vertinti žemės sankasos įrengimo technologiją naudojant tamprumo modulį. Mokslininkai apžvelgė nesurištų medžiagų apibūdinimus. Automobilių kelio dangos projektavimo vadove, dar vadinamame 2002 m. projektavimo vadovu. Daugiausia dėmesio skyrė Minesotos smulkiagrūdžių gruntų k_1 -, k_2 - ir k_3 - parametrų rinkimui ir tamprumo modulio bandymo aiškinimo procedūrai, kad būtų galima pateikti įvestį daugiasluoksnės tamprumo teorijos (MLET) analizei (2 lygio įvestis). Tai svarbus pritaikymo aspektas, nes automobilių kelio dangos projektavimo vadove rekomenduojama matuoti tamprumo modulius atliekant laboratorinius bandymus, tačiau procedūroje nenurodoma, kaip interpretuoti bandymų duomenis, kad būtų galima gauti įvesties duomenis MLET analizei. Atsparumo modulio bandymų rezultatai, gauti iš 23 bandinių, surinktų automobilių keliose Minesotos vietovėse, buvo naudojami informacijai netiesinių baigtinių elementų programai ir daugiasluoksnės tamprumo teorijos programai gauti. Gauti tamprumo moduliai buvo palyginti su MEPDG rekomenduojamais grunto tamprumo modulio intervalais pagal grunto klasifikaciją (3 lygio įvestis). Nustatyta, kad MEPDG 3 lygio intervalai yra pagrįsti [38].

Tuo tarpu Kazmee'as ir Tutumluer'as [14], atsižvelgdami į tai, kad įprastiniai laboratoriniai bandymai apsiriboja tik tam tikrų dydžių dalelėmis, nusprendė sukurti žemės sankasos pagrindo medžiagoms

įvertinimo metodus, susijusius su jų šaltiniu, sudėtimi ir dalelių dydžio bei formos savybėmis. Savo ataskaitoje pateikė sankasos įrengimo technologijų vertinimo pagrindimą, atsižvelgiant į didelių matmenų užpildų žemės sankasos savybes ir eksploatacinių savybių tendencijas. Siekiant kiekybiškai nustatyti tipinius žemės sankasos sluoksnių dalelių dydžius, viršijančius įprastines sietų analizės dydžio ribas ir su tuo susijusius morfologinius vaizdo rodiklius, apibūdinančius žemės sankasos plokštumo ir pailginimo, kampuotumo ir paviršiaus tekstūros savybes, buvo naudojamas naujausias vaizdo segmentavimo metodas. Atliekant eksploatacinių savybių bandymus, projekte buvo numatytas lauko komponentas, kurio metu įrengti pilno mastelio bandomieji ruožai, kad būtų įvertintos provėžų susidarymo savybės, esant imituotai eismo apkrovai [14]. Minėti mokslininkai, žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimo metu atrinko šešias tipines grunto užpildų rūšis atsižvelgiant į jų įprastą naudojimą Ilinojaus valstijoje (JAV). Iš šešių medžiagų trys buvo pirminės, o trys – perdirbtos. Be to, dviejų rūšių užpildai buvo pasirinkti siekiant įvertinti, ar medžiagos tinkamos naudoti kaip žemės sankasos sluoksnis virš natūralaus pagrindo sluoksnio. Siekiant įvertinti kai kurias svarbiausias šių medžiagų savybes, buvo parengta eksperimentinių bandymų matrica. Visų medžiagų, naudotų pilno mastelio bandomojo ruožo konstrukcijoje, dalelių dydžio pasiskirstymas nustatomas atliekant įprastinę analizę arba atliekant lauko vizualizaciją. Be to, buvo atliktas bandymas su trijų rūšių užpildų tipais, siekiant įvertinti žemės sankasos tvirtumą ir atsparumą dilimui bei suirimui. Dviejų sankasos sluoksnių drėgmės tankis arba sutankinimo charakteristikos buvo nustatytos naudojant standartinę Proktoro sutankinimo jėgą. Su daugeliu žemės sankasos sluoksnių atlikti trišiai šlyties stiprumo bandymai. Mokslininkai atkreipia dėmesį, kad ne visas medžiagas buvo galima išbandyti laboratorijoje dėl didelių žemės sankasos sluoksnių medžiagų dalelių dydžių ir esamos laboratorinės įrangos apribojimų. Atliktų bandymų pabaigoje, atsižvelgiant į statybinėse platformose ir lanksčiosios automobilių kelio dangos bandomuosiuose ruožuose pastebėtus provėžų susidarymo rodiklius, Kazmee'as ir Tutumluer'as [14] teikia tokias pastabas:

- įrodyta, kad didelių uolienu (t. y. užpildų pagrindo) skverbimasis į labai minkštą žemės sankasos sluoksnį yra veiksmingas siekiant pagerinti silpną sankasą ir paruošti gana stabilų darbinės platformos sluoksnį automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijoje;
- kadangi pakartotinai uždengtose automobilių kelio atkarpose susikaupė didesnės nuolatinės deformacijos, reikėtų toliau vertinti perdirbtų asfalto dangų medžiagų naudojimą uždengimo medžiagoms ir, tikėtina, jį sumažinti iki minimumo;
- tolygiai surūšiuotos medžiagos gali pasižymėti didesniais riedėjimo savybių svyravimais dėl esančių tuštumų. Nesant mažesnio dydžio dalelių, sankasos sluoksnių tarpusavio sąveika užpildų pagrindo sandūroje yra minimali, o tai galiausiai turi įtakos ir žemės sankasos stiprumui;
- kadangi plonas (76 mm) žemės sankasos viršutinis sluoksnis turėjo įtakos kitoms, ypač apatinių sluoksnių, žemės sankasos eksploatacinėms savybėms, žemės sankasos įrengimo metu turi būti skiriamas ypatingas dėmesys žemės sankasos sluoksnių kokybės vertinimui specialiu prietaisu. Toks prietaisas kaip kintamos energijos PANDA skvarbos testeris kartu su geoendoskopiniu vaizdavimu gali būti naudingas atliekant užbaigto paviršiaus kokybės kontrolę tam, kad prieš klojant papildomus žemės sankasos sluoksnius būtų galima aptikti bet kokius storio svyravimus ir prevenciškai pakeisti atitinkamus žemės sankasos sluoksnius [14].

Alharbi's ir kt. [39] parengė metodiką, skirtą įvertinti visus tris tvarumo aspektus, įskaitant ekonominį (statybos sąnaudos), aplinkosauginį (gamtos išteklių išekvojimas) ir socialinį (pažangios įrangos ir kvalifikuotos darbo jėgos poreikis), susijusius su įvairiais automobilių kelio dangos įrengimo scenarijais. Tyrime minėti mokslininkai įvertino šalto perdirbimo vietoje (CIR) dangos, kuri elgiasi

panašiai kaip HMA danga veikiant skirtingoms eismo apkrovoms, lygiavertį storį. Buvo parengta penkiasdešimt CIR ir HMA scenarijų skirtingiems eismo intensyvumams ir dangos žemės sankasos sluoksnių storiams. Galiausiai visų scenarijų tvarumas įvertintas atsižvelgiant į eismo paskirtį Saudo Arabijoje, taikant neaiškiu pagrindu pagrįstą daugiakriterį vertinimą. Vadovaujantis atliktais bandymais mokslininkai nustatė, kad CIR yra tvaresnis dangos variantas nacionalinės reikšmės keliams, kolektoriams, pagrindinėms miestų gatvėms, greitkeliams ir intensyvaus eismo greitkeliams pramoninėse zonose, kur ESAL (ekvivalentinė vienos ašies apkrova) svyruoja nuo 2 000 000 kg iki >31 000 000 kg. Atsižvelgiant į ribotą pažangios įrangos ir kvalifikuotos darbo jėgos prieinamumą CIR dangoms nustatyta, kad HMA yra tvaresnis variantas „labai mažo“ eismo klasės keliams. Mokslininkų pasiūlyta metodika gali padėti automobilių kelio dangų projektuotojams priimti sprendimus dėl tvarių automobilių kelio dangų bei žemės sankasos įrengimo technologijų pasirinkimo įvairių tipų keliams [39].

Savo ruožtu Pozarycki's [40] įsitikinęs, kad visų anksčiau minėtų prietaisų taikymas, išsamūs laboratoriniai vertinimai ar kiti vietoje atliekami eksperimentiniai tyrimai, jeigu jie atliekami pavieniais atvejais, apsiriboja taškiniais ir vietiniais matavimais [40]. Remiantis šia nuostata galima teigti, kad siekiant atlikti išsamų žemės sankasos įrengimo technologijų vertinimą, būtina taikyti daugiakriterį vertinimą.

Apibendrinant galima teigti, kad norint įvertinti žemės sankasos įrengimo technologiją, reikia nustatyti žemės sankasos stiprumą ir numatomo eismo apkrovą. Žemės sankasos stiprumui įtakos turi medžiagų fizinės ir mineraloginės savybės, tankis ir drėgmės kiekis [28], kai ji sutankinama ir eksploatuojama. Geriausias rezultatas paprastai nustatomas remiantis praktine patirtimi, paremta lauko bandymais. Kai kurie mokslininkai siūlo greta lauko bandymų atlikti ir laboratorinius tyrimus [1].

1.4. Sankasos stiprinimas cementu

Gerinant sankasą cementu, konstrukcijos storis rekomenduojamas ne mažesnis kaip 20 cm. atlikus sutankinimą. Išilginės ir skersinės sujungimo siūlės turi prasikeisti mažiausiai 20 cm pločiu dar kartą maišant jas freza prijungus prie naujo sutankinto sluoksnio [41]. Įprastais atvejais gruntams pagerinti naudojami 32,5 R stiprio klasės cementai. Esant ypatingoms sąlygoms (šalčio poveikis, blogos oro sąlygos ir kt.) yra galimybės panaudoti ir didesnio stiprio cementą [42].

Rajoninio kelio Nr. 3509 sankasos įrengimas panaudojant 2 % 42,5 R stiprio cementą [43] (žr. 10 pav.)



10 pav. Atliktas sankasos stiprinimas cementu [sudaryta autoriaus]

Atliktas tyrimas, kuriame bandymai atlikti Mongolijoje ir Kinijoje, sezoniškai užšalancioje vietoje. Esamas gruntas – priemolis su dumblo priemaišomis. Sankasai pagerinti naudojamas 42,5 R portlandcementis. Nustatytas sankasos stiprumo gniuždymui padidėjimas, ir apie 20 % geresnis poveikis šalčio ciklams. Naudojant cementą pagrindas ne tik tvirtesnis, bet ir stabilesnis prieš šaltį [44].

1.5. Sankasos stiprinimas geosintetika

Pagal MN GEOSINT ŽD 13 metodinius nurodymus geosintetika apibūdinama kaip bendrinis terminas juostos, lakšto, trimatės formos statybos produktas, kai bent vienas iš komponentų yra sintetinis arba natūralus polimeras, turintis tiesioginį kontaktą su gruntu ar kitomis medžiagomis, atliekant žemės darbus [45]. Sankasos stiprinimas atliktas kelyje Nr. 4519 Gryblaukis – Batakiai naudojant geotekstilę ant nestabilaus pagrindo kai šalia yra vandens telkinys, padidino laikomąją gebą tris kartus [46].

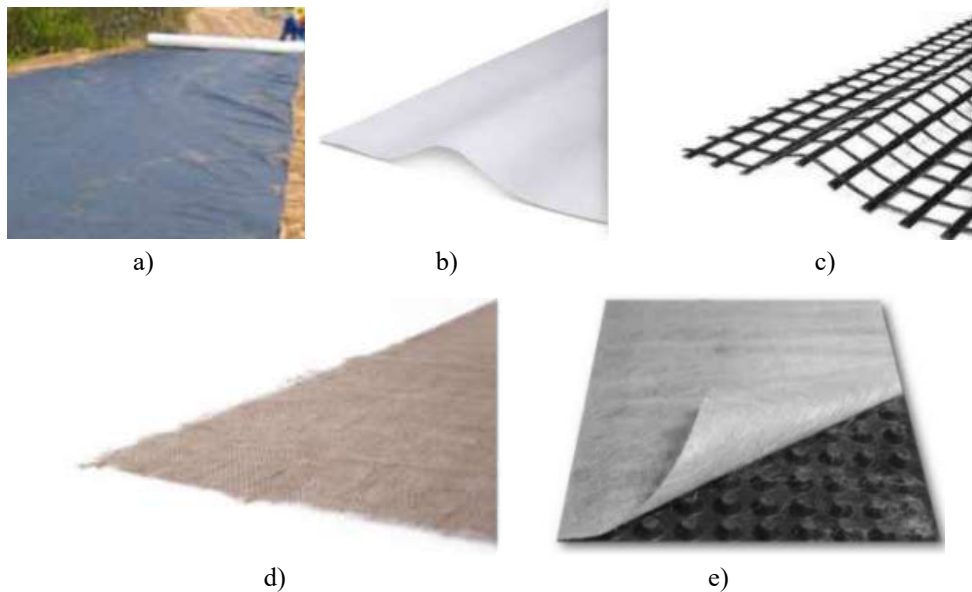
Geosintetikos pagrindiniai gaminiai (žr. 4 pav.):

- GSY – geosintetika;
- GTX – geotekstilė;
- GGR – geotinklas;
- GBR – geosintetinė užtvara;
- GCO – geokompozitas [45].

Šiame tyrime analizuojamos dažniausiai naudojamų geosintetinių medžiagų rūšys – geotekstilė ir geotinklo panaudojimas stiprinant sankasą. Todėl kiti geosintetikos gaminiai nenagrinėjami.

Geotekstilė apibūdinama kaip laidai, plokšti polimerinės tekstilinės medžiaga. Kuri gali būti naudojama austinė, neaustinė [47]. Austinės geotekstilės dažniausiai naudojamos armatūros ir atskiriamasis sluoksniai sankasos grunte.

Ją taip pat galima panaudoti kaip filtrą, kuri paklota tarp smėlinių gruntų. Neaustinės geotekstilės dažniausiai naudojamos kaip gruntų atskyrimo ir filtravimo sluoksnio. Ji tinkama ir geosintetinių užvarų apsaugai. Dėl poringos struktūros, geotekstilės labai gerai laidžios vandeniui visomis kryptimis [45].



11 pav. Geosintetikos pagrindiniai gaminiai: a) geosintetika [48]; b) geotekstinė [49]; c) geotinklas [49]; d) geosintetinė užtvara [49]; e) geokompozitas [49]

Geotekstilės funkcijos:

- atskyrimas;
- filtravimas;
- armavimas;
- drenavimas;
- apsauga.

Atskyrimas – sustabdyti smulkių ir stambių gruntų susimaišymą. Neleidžia atsirasti vietiniams praspaudimams silpnoje sankasoje. Filtravimas – geotekstilė, perskirta tarp sankasos sluoksnių veikia kaip filtras. Vanduo lengvai juda tarp sluoksnių, o smulkios grunto dalelės neturi galimybės judėti. Armavimas – geotekstilė perima grunte susidariusias tempimo jėgas. Sumažinamos grunto deformacijos, bei jų nevienodumas armuotuose statiniuose. Drenavimas – per sluoksnius persisunkusio vandens surinkimas bei nuvedimas tinkama kryptimi. Apsauga – šlaitų apsauga nuo vandens bei vėjo sukeltos erozijos. Apsauga reikalinga tol, kol nesuvešėjo žolė [45]. Naudojant geosintetinius gaminius žemės sankasoje, reikalaujama, kad projektinis medžiagos stipris tempiant ją būtų – 100 metų. Todėl reikia įsivertinti, ar medžiagos pakankamai ilgaamžės. Gaminiais yra įvertinami saugos koeficientai, kurie priklauso nuo valkšnumo (pagaminimo žaliavos) JAV atliktas didelis dviejų etapų tyrimas: 2009 ir 2014 m Tyrimo ruožai buvo labai panašių geologinių sąlygų gruntai (smėlingas molis). Sankasa įrengta 1,0 metro gylyje. Sankasos laikomoji geba prieš geotinklo panaudojimą – 10 MPa. Panaudojus geotinklą pasiektas 30 MPa stipris [47].

1.6. Sankasos stiprinimas kalkėmis

Stiprinimas kalkėmis keičia sankasos ilgalaikį tvirtumą ir stabilumą. ML (mažo plastiškumo smulkiagrūdis molis) puikiai tinkantis gruntas sankasos gerinimui [50]. Tyrime, atliktame Vengrijoje, naudotos negesintos kalkės sankasos gerinimui. Bandymai atlikti 10 vietų. Bandymas štampos metodu atliktas skirtingu metu. Pirmiausia prieš stabilizavimą o po to: 0, 24, 48 val. nuo stabilizavimo pabaigos. Prieš stabilizavimą E_{v2} – 10 MPa, 0 val. – E_{v2} – 28 MPa, po 24 val. E_{v2} – 43 MPa, po 48 val. E_{v2} – 51 MPa. [51] R. Tanzadeh ir kt. (2019) straipsnyje analizuojamos mikro – nano kalkės kelio sankasoje. Naudojant modifikuotą molį su mikro – nano 1 % kalkėmis, po 28 parų pasiektas 90 MPa

stipris, o naudojant modifikuotą molį su 4 % kalkėmis pasiektas 82 MPa stipris. Modifikuotos kalkės įgauna didesnį stiprį [52]. Kalkių panaudojimas sankasai įrengti yra puikiai tinkantis būdas. Kalkių mišinio savybės gerėja nuo jo tankio. Kiekvienu stabilizavimo atveju reikia atkreipti dėmesį į mišinio drėgmės kiekį, norint pasiekti reikiama sutankinimą [53]. 12 paveiksle pateikti mechanizmai reikalingi sankasos gerinimui kalkėmis.



12 pav. Mechanizmai reikalingi sankasos gerinimui kalkėmis (kairėje traktorinė freza, dešinėje traktorinis kalkių paskleistuvas) [54]

Pagrindiniai veiksniai, galintys paveikti procesą yra mišinio sudedamųjų dalių identifikavimo parametrai, tokie kaip: gruntas, naudojamos kalkės, jei reikia hidraulinis rišiklis. Svarbiausi parametrai yra šie:

1. gruntas – dalelių dydžio pasiskirstymas, plastiškumas, potencialiai kenksmingų medžiagų kiekis, natūralus vandens kiekis (kuris yra esminis pasirenkant naudojamų kalkių rūšį ir dozę), tankis;
2. kalkės (oro kalkės): į mišinį dedama kalkių forma: sumaltos negesintos kalkės (kalcio oksidas), hidratuotos kalkės (kalcio hidroksidas) – sausos arba tirštos tešlos masės ir kalkių pieno suspensija. Jos vartojamos tada, kai gruntų drėgnis viršija optimalųjį drėgnį;
3. hidraulinis rišiklis: bendras sudedamųjų dalių mišinys, galintis paveikti hidraulinio nustatymo kinetiką, veikimo lygį ir suderinamumą su grunto cheminėmis sudedamosiomis dalimis [53].

Kalbant apie grunto ir grunto su pridėtomis kalkėmis sąveiką, valdantys mechanizmai skirstomi į tokius:

1. trumpalaikis poveikis: jis išgaunamas tuo metu, kai kalkės išpilamos į gruntą ir sumaišomos;
2. ilgalaikis poveikis: tai vyksta įrengus konstrukciją (kelių mėnesių ar metų) [53].

Atlikti tyrimai parodo, kad sankasos pagerinimas kalkėmis efektyviai pagerina sankasos laikomąją gebą. Naudojant modifikuotą molį su kalkėmis pasiekiami aukštesni rezultatai, nei natūralaus molio su kalkėmis.

2. Sankasos įrengimo technologijos tyrimo ir daugiakriterio vertinimo metodika

Šiame skyriuje aprašoma sankasos įrengimo technologijos metodika. Analizuojami šie aspektai:

- laboratorinis tyrimas. Statinio apkrovimo plokšte bandymas. Analizuojama kokios paskirties statiniams naudojamas bandymas, naudojama pagrindinė įranga, reikalingos bandymo sąlygos, bandymo atlikimas, rezultatų gavimas.
- Ekonominis rodiklis – kaina. analizuojama iš ko susideda bendra analizuojamos technologijos kaina.
- Mechanizmų ir žmogaus darbo sąnaudos. Analizuojami reikalingi mechanizmai, žmonių kiekis.
- Ekspertų apklausa. Analizuojamas ekspertų apklausos patikimumo skaičiavimas.
- Daugiakriterio vertinimo MOORA metodu skaičiavimo analizė.

2.1. Laboratorinis tyrimas. Statinio apkrovimo plokšte bandymas

2.1.1. Bandymo taikymo sritis

Statinio apkrovos plokšte bandymas yra skirtas kelių, geležinkelių, gatvių, vandens uosto statinių, oro uostų statinių, sporto paskirties inžinerinių statinių ir kitos paskirties inžinerinių statinių [55] sankasos laikomajai gebai nustatyti. Šiuo bandymu nustatoma tiriamojo grunto, jo įvairių mišinių (pvz.: gruntas su hidrauliniiais riškiais) deformacijos kreivė, veikiant kintančiai statiniai apkrovai.

2.1.2. Įranga naudojama bandymui

Atlikti statinio apkrovimo plokšte bandymą, reikalinga ši įranga:

- apkrovos atsvara. Tai atsvara, kurios svoris yra ne mažesnis už 45,34 kN, jeigu naudojama 300 mm apkrovimo plokštė. 80,69 kN, jeigu naudojama 600 mm apkrovimo plokštė ir 101,21 kN, jeigu naudojama 762mm. apkrovimo plokštė. Šis svoris susideda iš didžiausios apkrovos naudojamos bandymui ir 10 kN rezervinio svorio. Dažniausiai atsvarai naudojama technika dirbanti statybvietyje, pvz., ekskavatorius, valcinis arba gruntinis volas, pakrautas sunkvežimis ar kita stabili ir tvirta atrama [56].
- plokštės spaudimo įrenginys, kuris susideda iš apkrovimo plokštės, apkrovimo įrenginio su hidrauliniu siurbliu, gulsčiuku, aukšto slėgio žarna, hidrauliniu cilindru. Pagal LST EN 10025-1 apkrovimo plokštei pagaminti, naudojamas plienas – S 355 J0 markės. Plokštės plokštumo didžiausias leistina nuokrypis 0,25 mm, o šiurkštumo – 0,20 mm. Patogiam plokštės transportavimui reikalingos dvi rankenos. Plokštės būna trijų skirtingų diametrų: 300 mm, 600 mm ir 762 mm. Kelių statyboje dažniausiai naudojama 300 mm skersmens plokštė. Jos storis privalo būti ne mažesnis nei 25 mm. 600 mm ir 762 mm skersmens plokštės storis – ne mažesnis nei 20 mm [57]. Šių diametrų plokštės dedamos ant 300 mm skersmens plokštės, todėl jos turi būti „radialios, simetriškai išdėstytos standumo briaunos, kurių viršus turi būti lygiagretus su apatiniu apkrovimo plokštės paviršiumi“ [56]. Apkrovimo įrenginys sudarytas iš hidraulinio siurblio, kuris sujungtas su hidrauliniu cilindru ir aukšto slėgio žarna. Žarnos ilgis negali būti trumpesnis nei 2000 mm. Taisyklingam vertikaliam jėgos perdavimui cilindru, jo galuose turi būti lankstinės jungtys, kurios neleidžia cilindru nuvirsti. Lankstinės jungtys nėra standžios, todėl reikia užtikrinti, kad cilindras stovėtų statmenai plokštės atžvilgiu. Paruošto apkrovimo įrenginio aukštis ne didesnis kaip 600 mm. Esant cilindro aukščio trūkumui iki atsvaros, naudojami cilindro ilginamieji elementai, kurie gali prailginti

- cilindrą mažiausiai 1000 mm. Ilginamieji cilindro elementai kaip ir cilindras turi būti statmenas plokštės atžvilgiu.
- jėgos matavimo įrenginys. Tai elektrinis arba mechaninis jėgos daviklis (įtempio matavimo prietaisas), kuris montuojamas prie hidraulinio siurblio su aukšto slėgio žarna. Daviklio paklaida negali viršyti 1 % didžiausios apkrovos naudojamos bandymui. Prietaiso skiriamoji geba turi būti ne mažesnė kaip $0,01 \text{ MN/m}^2$, kai naudojama 300 mm skersmens apkrovimo plokštė. Naudojant 600 mm ir 762 mm skersmens apkrovimo plokštes – ne mažesnė kaip $0,001 \text{ MN/m}^2$.
 - nuosėdžio matavimo įrenginys sudarytas iš trijų dalių: trimis taškais besiremiančio laikančiojo rėmo, vertikaliai judančios, sukimui ir lenkimui atsparios gembės ir poslinkio daviklio arba indikatoriaus. Atliekant bandymus iki 0,3 m gylio iškasose naudojamas įrenginys su svirtine gembe. Norint bandymą atlikti gilesnėse iškasose, reikalingas įrenginys su ašine kryptimi judančia gembe [57].

13 paveikslėlyje pateikta reikalinga įranga bandymui atlikti.



13 pav. Reikalinga įranga bandymui atlikti [sudaryta autoriaus]

2.1.3. Bandymo sąlygos

Statinio apkrovimo plokštė bandymas naudojamas nuo standžių iki kietų smulkiagrūdžių, įvairiagrūdžių ir stambiagrūdžių gruntų. Bandymas neatliekamas jei dalelių dydis yra didesnis už $\frac{1}{4}$ statinio plokštės skersmens dydžio. Pvz.: tyrimui naudojama 300 mm skersmens plokštė, o tiriamo grunto frakcija 0/90. Tokiu atveju naudojama 600 mm arba 762 mm skersmens plokštė. Esant smulkiagrūdžiams gruntams tokiems kaip dulkis ar molis, bandymo metu rezultatus galima vertinti jeigu jie standžios konsistencijos. Esant abejonėms, patikrinamas grunto standumas mažiausiai 300 mm gylyje. Bandymo atlikimo temperatūra turi būti nuo $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $+40 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Bandymas neatliekamas, jeigu lyja ar sniega. Laborantas atliekantis bandymą turi įsitikinti, kad grunto paviršinė dalis neįšalususi. Jeigu abejojama, prieš bandymą, po bandomoju paviršiumi iki apkrovimo plokštės skersmens gylio patikrinama grunto būklė [58].

2.1.4. Bandymo aikštelės paruošimas ir įrenginio pastatymas

Bandymo aikštelės vieta turi būti lygi, kad pastačius matavimo įrenginį, jis stovėtų taisyklingai. Jeigu bandymo vietoje yra birių grunto dalelių, jos turi būti pašalintos [56].

Apkrovimo plokštė visu plotu uždengiama ant bandomojo grunto paviršiaus. Jeigu pagrindas po apkrovimo plokšte nėra lygus, po juo reikia pasipilti kelių milimetrų sauso smėlio arba gipso skiedinio. Paruošus pagrindą, dedama plokštė. Sukamaisiais judesiais ir lengvu paspaudimu plokštė pastatoma į bandymo vietą. Naudojant gipso skiedinį, plokštės paviršius patepamas alyva. Bandymas pradedamas, kai gipso skiedinys sustingsta [56].

Ant padėtos apkrovimo plokštės, centre statmenai, pastatomas hidraulinis cilindras. Cilindras pakišamas po apkrovos atsvara. Bandymas tęsiamas, įsitikinus, kad cilindras nenuvirto. Esant bandiniams, kurių paviršiai yra su nuolydžiu, privaloma užtikrinti apkrovimo įrenginio stabilumą. Tarp apkrovimo plokštės ir apkrovos atsvaros vietos privalo atstumai [57]:

- naudojant 300 mm apkrovimo plokštę, nemažesnis nei – 0,75 m;
- naudojant 600 mm apkrovimo plokštę, nemažesnis nei – 1,10 m;
- naudojant 762 mm apkrovimo plokštę, nemažesnis nei – 1,30 m.

Atlikus apkrovimo plokštės ir hidraulinio cilindro surinkimą, toliau įrenginėjamas nuosėdžio matavimo įrenginys. Nuosėdis dažniausiai matuojamas poslinkio davikliu arba indikatoriumi. Retais atvejais alternatyviomis matavimo sistemomis. Nuosėdžio matavimo jutiklis nustatomas ties apkrovimo plokštės centru. Tarp laikančiojo rėmo atramų ir atsvaros atramos vietų, privalomas ne mažesnis kaip 1,25 m atstumas. Poslinkio daviklis nustatomas statmenai bandomajam paviršiui. Bandymo metu nuosėdžio įrenginio negali veikti tiesioginiai saulės spinduliai, vėjas, lietus ir vibracija. Bandinys veikiamas vibracijos gali turėti įtakos rezultatams [57].

2.1.5. Pradinis plokštės apkrovimas

Prieš pradedant bandymą, jėgos daviklis ir poslinkio daviklis (arba indikatorius) pastatomas į nulinę padėtį. Jeigu plokštė yra 300 mm arba 600 mm skersmens, plokštė apkraunama pradine $0,01 \text{ MN/m}^2$ apkrova. Naudojant 762 mm skersmens plokštę – $0,005 \text{ MN/m}^2$. Poslinkio daviklis (arba indikatorius) vėl pastatomas į nulinę padėtį praėjus 30 sekundžių nuo plokštės apkrovimo pradžios [56].

Norint nustatyti deformacijos modulį, apkrovimą reikalinga didinti mažiausiai šešis kartus vienodo dydžio intervalais. Apkrovimas didinamas kol pasiekiamas iš anksto nustatytas didžiausias įtempio dydis. Apkrovimo didinimas turi būti atliktas per 1 minutę. Apkrovimo plokštė nukraunama 3 etapais: ne daugiau 50 %, ne daugiau 25 % ir ne daugiau 2 % didžiausios pasiektos apkrovos vertės. Nukrovus plokštę, atliekamas antrasis apkrovimo ciklas, bet tik iki priešpaskutinės pirmo apkrovimo ciklo apkrovos vertės. Didinant ir mažinant apkrovas būtina laukti bent 60 sekundžių. Tuo metu apkrovos dydis negali keistis. Visos gautos reikšmės užrašomos į bandymo ataskaitą [57].

Naudojant 300 mm skersmens apkrovimo plokštę, apkrova didinama iki $0,5 \text{ MN/m}^2$ arba pasiekiamas 5 mm nuosėdis. Naudojant 600 mm skersmens apkrovimo plokštę, apkrova didinama iki $0,25 \text{ MN/m}^2$ arba pasiekiamas 8 mm nuosėdis. 762 mm skersmens apkrovimo plokštei, ribinė vertė – $0,2 \text{ MN/m}^2$ arba 13 mm. Bandymo metu pastebėjus, kad apkrovos didinimas sukelia žymų nuosėdžio padidėjimą, artimą grunto įlūžimui, bandymas yra nutraukiamas [56].

2.1.6. Rezultatų pateikimas

Deformacijos kreivė sudaroma iš vidutinio normalinio įtempio σ_0 ir poslinkio daviklio rodmenų vertės s_m . Rezultatai užrašomi bandymo ataskaitoje. Jeigu skaičiuojama pagal svirties principu pasukamos gembės, kur nuosėdžio matavimas įvertinamas svirties pečių santykiu $h_p:h_M$. Nuosėdis apskaičiuojamas: indikatoriaus rezultata padauginus iš svirtinės gembės pečių santykio. Naudojant linijiniame guolyje judančia gembę, kai nuosėdžio matavimas, svirties pečių santykis yra 1:1, prietaiso rezultatas sutampa su nuosėdžiu. Deformacijos kreivė suformuojama iš pirmojo ir antrojo apkrovimo ciklą matavimo taškų [58].

Bandymo rezultatų ataskaitoje reikalinga papildoma informaciją apie bandinį [56]:

1. Oro sąlygos, temperatūra:
2. Bandymo aikštelės savybės:
3. Apkrovimo plokštės skersmuo:
4. Nuosėdžio matavimo įrenginio tipas:
5. Grunto rūšis (nustatoma vizualiai):
6. Išlyginamojo sluoksnio po apkrovimo plokšte rūšis:
7. Bandymų pradžia:
8. Bandymo aikštelės nukasimo duomenys (jeigu reikėjo nukasti):
9. Bandymą atliko:

Deformacijos modulis E_v nustatomas pagal pirmojo ir antrojo apkrovimo ciklą deformacijos kreivės. Deformacijos kreivės „apskaičiuojamos pagal 2-ojo laipsnio daugianario lygtį, o daugianario konstantos nustatomos prilyginus jas išmatuotoms vertėms pagal mažiausios kvadratinės nuokrypos metodą.“ [56] Antrojo laipsnio daugianario lygtis apskaičiuojama [59]:

$$s = \alpha_0 + \alpha_1 * \sigma_0 + \alpha_2 * \sigma_0^2; \quad (1)$$

čia σ_0 – vidutinis normalinis įtempis po apkrovimo plokšte, MN/m²;

s – apkrovimo plokštės nuosėdis, mm;

α_0 – 2-ojo laipsnio daugianario konstanta, mm;

α_1 – 2-ojo laipsnio daugianario konstanta, mm/(MN/m²);

α_2 – 2-ojo laipsnio daugianario konstanta, mm/(MN/m⁴).

Nustatant pirmojo apkrovimo ciklo konstantas, pirmoji apkrovimo pakopa nevertinama. Nustatant antrojo apkrovimo ciklo konstantas, pirmoji apkrovimo pakopa įvertinama. Daugianario konstantos apskaičiuojamos pagal standartines lygtis [60]:

$$B.1 \alpha_0 * n + \alpha_1 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i} + \alpha_2 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i}^2 = \sum_{i=1}^n s_i; \quad (2)$$

$$B.2 \alpha_0 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i} + \alpha_1 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i}^2 + \alpha_2 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i}^3 = \sum_{i=1}^n s_i * \sigma_{0i}; \quad (3)$$

$$B.3 \alpha_0 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i}^2 + \alpha_1 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i}^3 + \alpha_2 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i}^4 = \sum_{i=1}^n s_i * \sigma_{0i}^2; \quad (4)$$

Tokiu būdu parametrai $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ žinomi [60].

Deformacijos modulis (E_{v1}) apskaičiuojamas kaip kirstinės modulis pagal elastingo izotropinio puserdvio teoriją. Kirstinė apibrėžiama kvadratiniais parabolės taškais [60]:

$$P_1(0,3\sigma_{0max}; s_1); P_2(0,7\sigma_{0max}; s_2); \quad (5)$$

E_{v1} apskaičiuojamas pagal formulę [57]:

$$\begin{aligned}
 E_{v1} &= 1,5 * r * \frac{\Delta\sigma}{\Delta_s} = 1,5 * r * \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{s_2 - s_1} \\
 &= 1,5 * r \\
 &* \frac{0,7\sigma_{0max} - 0,3\sigma_{0max}}{[\alpha_0 + \alpha_1 * 0,7\sigma_{0max} + \alpha_2 * (0,7\sigma_{0max})^2] - [\alpha_0 + \alpha_1 * 0,3\sigma_{0max} + \alpha_2 * (0,3\sigma_{0max})^2]} \\
 &= 1,5 * r * \frac{0,4*\sigma_{0max}}{0,4*\alpha_1\sigma_{0max}+(0,7^2*\alpha_2-0,3^2*\alpha_2)\sigma_{0max}^2} = 1,5 * r * \frac{1}{\alpha_1+\alpha_2*\sigma_{0max}}; \tag{6}
 \end{aligned}$$

Deformacijos modulis (E_{v2}) apskaičiuojamas pagal 2-ojo apkrovimo ciklo deformacijos kreivę panaudojant σ_{0max} iš 1-ojo apkrovimo ciklo [60].

Tyrime gautų statinio apkrovimo plokšte bandymo rezultatų apdorojimas atliekamas aritmetinio vidurkio pagalba. Vidurkis apskaičiuojamas pagal formulę [61]:

$$\bar{x} = \frac{x_1+x_2+\dots+x_n}{n} = \frac{\sum x_i}{n}; \tag{7}$$

čia x_1, x_2, x_n galimos reikšmės, n – galimų reikšmių kiekis.

2.2. Ekonominis rodiklis – kaina

Vienas iš svarbiausių aspektų statybose – tai atliekamų darbų kaina. Dažniausiai pagal finansavimo dydį sprendžiamas projektų įgyvendinimas. Tyrime analizuojamų technologijų kaina sudaryta iš:

- mechanizmų kainos;
- žmogaus darbo užmokesčio kainos;
- medžiagų kainos;

Kainos skaičiavimui naudojama kompiuterinė programa „Sistela“. Dalis analizuojamų projektų yra pastatyti prieš kelis metus, o kiti tik statomi. Todėl reikalinga racionaliai įvertinti ir palyginti sankasos įrengimo kainas. Naudojamos medžiagos, mechanizmai ir žmogaus darbo užmokestis skaičiuojamas pagal 2022.11 vidinius kelių ir tiltų statybos įmonės medžiagų, mechanizmų, žmogaus darbo užmokesčio kainynus.

2.3. Mechanizmų ir žmogaus darbo sąnaudos

Darbų atlikimui reikalingi įvairūs mechanizmai ir žmonių darbo jėga. Normos priimamos iš sąmatų skaičiavimo programos „Sistela“. Sankasos įrengimui su cementu reikalingi:

- autogreideris su nuveliavimu (virš 80 kW/ virš 12 t), darbo norma 100 m² – 0,859 maž.val.;
- vandenvėžis, darbo norma 100 m² – 0,9 maž.val.;
- traktorius (virš 100 kW), darbo norma 100 m² – 0,45 maž.val.;
- grunto volas (virš 10 t – vieno būgno), darbo norma 100 m² – 0,45 maž.val.;
- cemento paskleistuvas, darbo norma 100 m² – 0,45 maž.val.;
- žmonių darbo norma 100 m² – 12,41 žm.val.

Sankasos įrengimui su geosintetika reikalingi:

- autogreideris su nuveliavimu (virš 80 kW/ virš 12 t), darbo norma 1000 m² – 3,50 maž.val.;
- grunto volas (virš 10 t – vieno būgno), darbo norma 1000 m² – 2,00 maž.val.;

- savivartis (virš 15 t, masė virš 26 t, 4 – ašiai), darbo norma $100 \text{ m}^3 - 1,2069 \text{ maš.val.}$;
- žmonių darbo norma $100 \text{ m}^3 - 128,34 \text{ žm.val.}$

Sankasos įrengimui su kalkėmis reikalingi:

- autogreideris su nuveliavimu (virš 80 kW/ virš 12 t), darbo norma $100 \text{ m}^2 - 0,859 \text{ maš.val.}$;
- vandenvežis, darbo norma $100 \text{ m}^2 - 0,9 \text{ maš.val.}$;
- traktorius (virš 100 kW), darbo norma $100 \text{ m}^2 - 0,45 \text{ maš.val.}$;
- grunto volas (virš 10 t – vieno būgno), darbo norma $100 \text{ m}^2 - 0,45 \text{ maš.val.}$;
- cemento paskleistuvas, darbo norma $100 \text{ m}^2 - 0,45 \text{ maš.val.}$;
- žmonių darbo norma $100 \text{ m}^2 - 12,37 \text{ žm.val.}$

Sankasos įrengimui be priedų reikalingi:

- autogreideris su nuveliavimu (virš 80 kW/ virš 12 t), darbo norma $1000 \text{ m}^2 - 1,75 \text{ maš.val.}$;
- grunto volas (virš 10 t – vieno būgno), darbo norma $1000 \text{ m}^2 - 1,00 \text{ maš.val.}$;
- žmonių darbo norma $100 \text{ m}^3 - 9,30 \text{ žm.val.}$

2.4. Ekspertų apklausa

Atliekant ekspertų apklausą, ekspertams sudarytos anketos, kuriuose vertinami technologijų lyginamieji kriterijai. Ekspertų apklausa skirta kelių ir tiltų statybos įmonės meistrams, darbų vadovams ir projektų vadovams, kurie vadovauja kelių, geležinkelių ir kitų inžinerinių statinių statybai. Ekspertų apklausa padeda apskaičiuoti lyginamųjų kriterijų reikšmingumą ir minimizuojamus, maksimizuojamus rodiklius. Atliktą apklausą reikia patikrinti ar nuomonės suderintos. Nuomonių suderinamumas apskaičiuojamas pagal formules [62]:

Vidutinio rango nustatymas [62]:

$$\bar{t}_j = \frac{(\sum_{k=1}^r t_{jk})}{r}; \quad (8)$$

čia t_{jk} – k eksperto j -ojo rodiklio įvertinimas (10 – aukščiausias, 1 – žemiausias)

r – ekspertų skaičius.

Kiekvieno efektyvumo rodiklio nuokrypio kvadratų sumos nustatymas [60]:

$$S = \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^r t_{jk} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^r t_{jk} \right]^2; \quad (9)$$

čia n – efektyvumo (tiriamųjų) rodiklių skaičius.

Konkordacijos koeficiento reikšmės nustatymas [1.5]* [60]:

$$\bar{W} = \frac{12S}{r^2 * (n^3 - n)}; \quad (10)$$

$$X^2 = \frac{12S}{r * n * (n+1)}; \quad (11)$$

14 pav. pateikta X_{lent}^2 reikšmių lentelė, iš kurių imama reikšmė palyginimui. Jeigu $X^2 > X_{lent}^2$, priklausanti nuo laisvumo laipsnio ($v = n - 1$) ir reikšmingumo lygio (0,01), priimama, kad ekspertų nuomonės suderintos [62].

ν	0.995	0.99	0.975	0.95	0.9	0.1	0.05	0.025	0.01
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	2.71	3.84	5.02	6.63
2	0.01	0.02	0.05	0.10	0.21	4.61	5.99	7.38	9.21
3	0.07	0.11	0.22	0.35	0.58	6.25	7.81	9.35	11.34
4	0.21	0.30	0.48	0.71	1.06	7.78	9.49	11.14	13.28
5	0.41	0.55	0.83	1.15	1.61	9.24	11.07	12.83	15.09
6	0.68	0.87	1.24	1.64	2.20	10.64	12.59	14.45	16.81
7	0.99	1.24	1.69	2.17	2.83	12.02	14.07	16.01	18.48
8	1.34	1.65	2.18	2.73	3.49	13.36	15.51	17.53	20.09
9	1.73	2.09	2.70	3.33	4.17	14.68	16.92	19.02	21.67
10	2.16	2.56	3.25	3.94	4.87	15.99	18.31	20.48	23.21
11	2.60	3.05	3.82	4.57	5.58	17.28	19.68	21.92	24.72
12	3.07	3.57	4.40	5.23	6.30	18.55	21.03	23.34	26.22
13	3.57	4.11	5.01	5.89	7.04	19.81	22.36	24.74	27.69
14	4.07	4.66	5.63	6.57	7.79	21.06	23.68	26.12	29.14
15	4.60	5.23	6.26	7.26	8.55	22.31	25.00	27.49	30.58
16	5.14	5.81	6.91	7.96	9.31	23.54	26.30	28.85	32.00
17	5.70	6.41	7.56	8.67	10.09	24.77	27.59	30.19	33.41
18	6.26	7.01	8.23	9.39	10.86	25.99	28.87	31.53	34.81
19	6.84	7.63	8.91	10.12	11.65	27.20	30.14	32.85	36.19
20	7.43	8.26	9.59	10.85	12.44	28.41	31.41	34.17	37.57
22	8.64	9.54	10.98	12.34	14.04	30.81	33.92	36.78	40.29
24	9.89	10.86	12.40	13.85	15.66	33.20	36.42	39.36	42.98
26	11.16	12.20	13.84	15.38	17.29	35.56	38.89	41.92	45.64
28	12.46	13.56	15.31	16.93	18.94	37.92	41.34	44.46	48.28
30	13.79	14.95	16.79	18.49	20.60	40.26	43.77	46.98	50.89
32	15.13	16.36	18.29	20.07	22.27	42.58	46.19	49.48	53.49
34	16.50	17.79	19.81	21.66	23.95	44.90	48.60	51.97	56.06
38	19.29	20.69	22.88	24.88	27.34	49.51	53.38	56.90	61.16
42	22.14	23.65	26.00	28.14	30.77	54.09	58.12	61.78	66.21
46	25.04	26.66	29.16	31.44	34.22	58.64	62.83	66.62	71.20
50	27.99	29.71	32.36	34.76	37.69	63.17	67.50	71.42	76.15
55	31.73	33.57	36.40	38.96	42.06	68.80	73.31	77.38	82.29
60	35.53	37.48	40.48	43.19	46.46	74.40	79.08	83.30	88.38
65	39.38	41.44	44.60	47.45	50.88	79.97	84.82	89.18	94.42
70	43.28	45.44	48.76	51.74	55.33	85.53	90.53	95.02	100.43
75	47.21	49.48	52.94	56.05	59.79	91.06	96.22	100.84	106.39
80	51.17	53.54	57.15	60.39	64.28	96.58	101.88	106.63	112.33
85	55.17	57.63	61.39	64.75	68.78	102.08	107.52	112.39	118.24
90	59.20	61.75	65.65	69.13	73.29	107.57	113.15	118.14	124.12
95	63.25	65.90	69.92	73.52	77.82	113.04	118.75	123.86	129.97
100	67.33	70.06	74.22	77.93	82.36	118.50	124.34	129.56	135.81

14 pav. Norminė χ^2_{lent} reikšmių lentelė [62]

2.5. Optimizavimo galimybių paieška. Daugiakriteris vertinimas MOORA metodu

Daugiakriteris vertinimas yra populiari tyrimų analizės priemonė. Mokslinės literatūros tikslas įgyvendinti daugiakriterį sprendimų optimizavimo metodiką pasitelkiant pasirinktą metodą. Remiantis W.K.Brauers'u ir kt. [63], MOORA metodas geriausiai apibūdina visapusišką tikslų optimizavimą sprendžiant daugiakriterius automobilių kelių projektus [63]. Todėl šiame tyrime naudojamas daugiakriteris MOORA metodas, kurio tiriamasis objektas yra kelio elementas – žemės sankasa [55].

Daugiakriterio optimizavimo santykių sistemos pagrindu metodą MOORA sukūrė W.K.Brauers'as ir E.K. Zavadskas [64], vėliau patobulino pridėdami pilnosios sandaugos formos metodą [63]. Pastarasis metodas pritaikytas daugelyje darbų (A.Baležentis ir T.Baležentis [65]). MOORA analizė pagrįsta įvairių prielaidų rinkiniu [64]. MOORA vertinimas prasideda nuo skirtingų kriterijų su skirtingomis alternatyvomis matricos sukūrimo. Šį vertinimą sudaro du metodai: santykio analizė ir atskaitos taškų teorija, pradedant anksčiau rasta santykio analize [63]. Šis metodas patogus, nes nėra sudėtingų matematinių skaičiavimų [65].

MOORA metodo skaičiavimai suskirstyti etapais:

1. Naudojant MOORA metodika pirmiausia sukuriama skirtingų alternatyvų ir tikslų matrica. Pradinės matricos formulė [66]:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1i} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{j1} & \cdots & x_{ji} & \cdots & x_{jn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mi} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}; \quad (12)$$

čia X_{ij} – sprendimų priėmimo matricos nariai;
 i – yra kriterijų skaičius;
 j – yra alternatyvų skaičius.

2. Sudaroma normalizuota matrica naudojant formulę [67]:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m x_{ij}^2}}; \quad (13)$$

čia m – alternatyvų skaičius;

n – rodiklių skaičius;

x_{ij}^* – skaičius reiškiantis normalizuotą j alternatyvos atsaką į i kriterijus.

3. Svertinė normalizuota matrica apskaičiuojama pagal formulę [66]:

$$y_j^* = \sum_{i=1}^{i=g} x_{ij}^* - \sum_{i=g+1}^{i=n} x_{ij}^*; \quad (14)$$

čia y_j – normalizuotos alternatyvos j vertinimas atsižvelgiant į visus kriterijus;

$i = 1, 2, \dots, g$ – kriterijai, kuriuos reikia maksimizuoti;

$i = g + 1, g + 2, \dots, n$ – kriterijai, kuriuos reikia minimizuoti.

4. Variantų reitingas sudaromas naudojant formulę [66]:

$$Min_{(j)} \{ max_{(i)} (r_i - x_{ij}^*) \}; \quad (15)$$

čia Min_j – yra minimali svertinė normalizuota alternatyvų matrica;

Max_i – yra maksimali svertinė normalizuota kriterijų matrica.

3. Tiriamoji dalis

3.1. Tiriamieji objektai

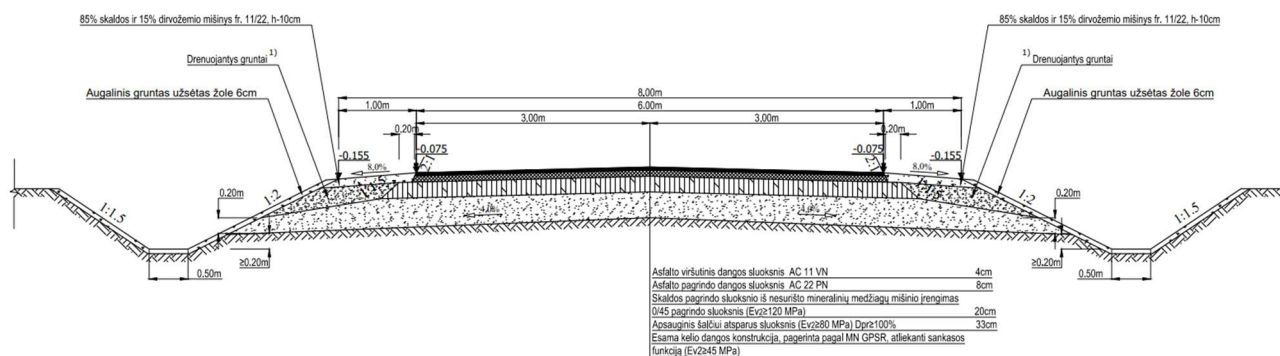
Tyrime analizuojami keturi kelio ruožai. Trys ruožai yra valstybinės reikšmės, V kategorijos rajoniniai keliai ir vienas kelio ruožas – C kategorijos gatvė. Visi statiniai priskiriami ypatingiems statiniams. Žemės sankasai keliami reikalavimai tiriamuosiuose ruožuose yra vienodi. Deformacijos modulis $E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$, sutankinimo rodiklis $D_{Pr} \geq 98 \%$ ($E_{v2}/E_{v1} \leq 2,50$), nuokrypis nuo projekcinio aukščio $\pm 5 \text{ cm}$, nuokrypis nuo projekcinio skersinio nuolydžio $\pm 0,5 \%$ [3].

I Tiriamasis objektas. 6 lentelėje pateikta informacija apie I tiriamąjį objektą.

6 lentelė. Trumpa informacija apie I tiriamąjį objektą.

Objekto pavadinimas	Tiriama kelio atkarpa	Sankasos gerinimo būdas	Bendri statinio duomenys ir parametrai
Valstybinės reikšmės rajoninio kelio nr. 3509 Viduklė – Gyliai – Šienlaukis ruožas nuo 7,41 iki 10,52 km	Pk. 83+00 – 85+00 (2000 m ²)	Žemės sankasos pagerinimas, naudojant 2 % cementą	Remontuojamo rajoninio kelio atkarpa yra priskiriama ypatingiems statiniams. Kategorija – V; Važiuojamosios dalies plotis – 6,00 m; Eismo juostų skaičius – 2; Ruožo ilgis (bendras) – 3,09 km

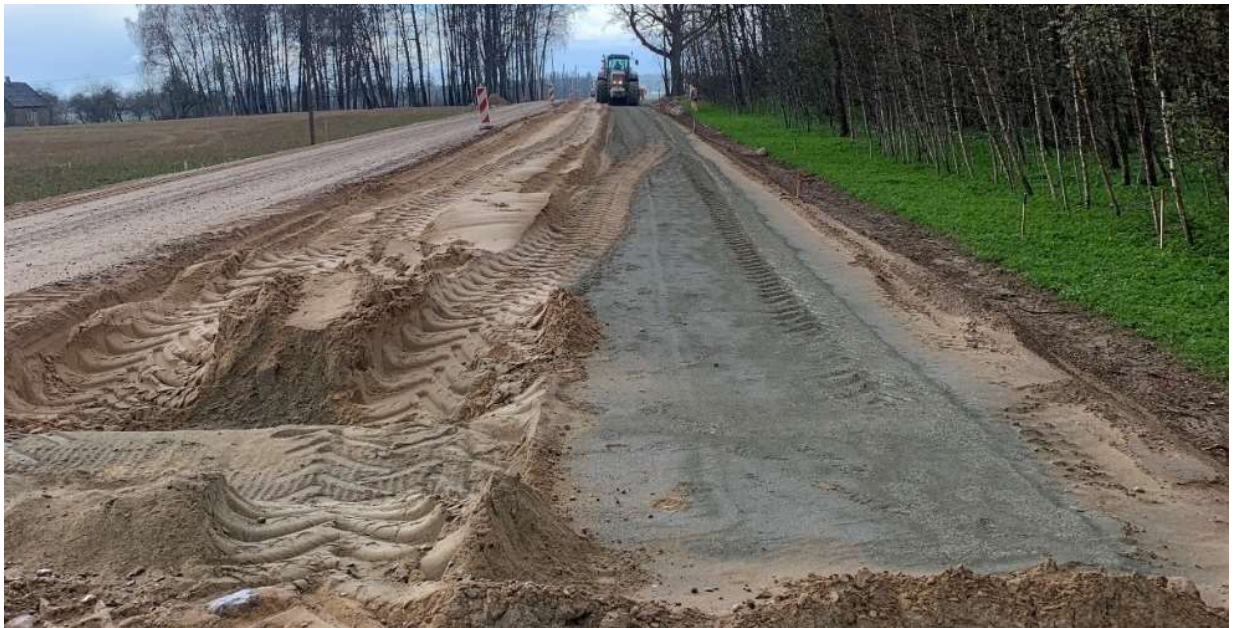
15 pav. pateiktas I tiriamojo objekto skersinis konstrukcijos profilis. Kelio konstrukcija susideda iš: stiprintos sankasos su 2 % cementu, apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio 33 cm, skaldos pagrindo iš nesurišto mineralinių medžiagų mišinio fr. 0/45 – 20 cm, asfalto pagrindo dangos sluoksnio AC 22 PN – 8 cm. ir asfalto viršutinės dangos sluoksnio AC 11 VN – 4 cm.



15 pav. Pirmojo tiriamojo objekto skersinis konstrukcijos profilis [43]

Žemės sankasos stiprinimo įrengimas atliekamas viso kelio pločiu. Grunto pagerinimas atliekamas pagal MN GPSR 12 reikalavimus, todėl atliekamas Proktoro tankio bandymas, kuriame nustatyta, kad žemės sankasos stiprinimui efektyviausias 2 % cemento įterpimas į esamą gruntą. Naudojamas 42,5 R stiprio cementas [43].

Sankasos įrengimas prasideda nuo cemento paskleidimo ant grunto. Paskleistas cementas frezuojamas traktorine freza (žr. 16 pav.).



16 pav. Sankasos frezavimas ant paskleisto cemento [sudaryta autoriaus]

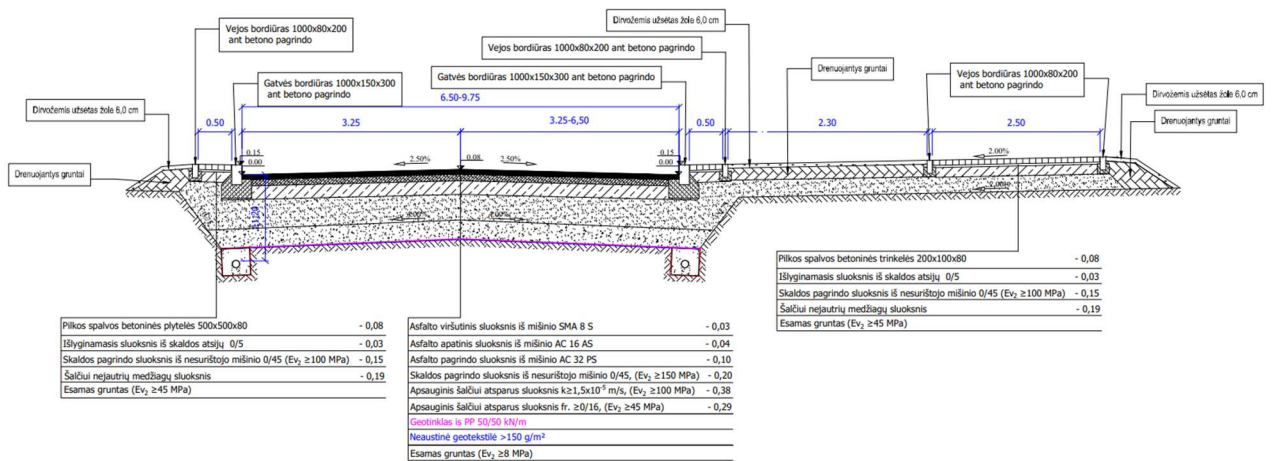
Cementas sumaišytas su gruntu tankinamas gruntuoliu ir laistomas vandenvėže. Sutankinus gruntą, autogreideris profiliuoja sankasą iki projektinio aukščio, skersinio ir išilginio profilio.

II Tiriamasis objektas. 7 lentelėje pateikta informacija apie II tiriamąjį objektą.

7 lentelė. Trumpa informacija apie II tiriamąjį objektą.

Objekto pavadinimas	Tiriama kelio atkarpa	Sankasos gerinimo būdas	Bendri statinio duomenys ir parametrai
Tauragės miesto pietinis aplinkkelis (1 etapas) nuo Vytauto g. Iki Dariaus ir Girėno g. (Naujoji g.)	Pk. 1+00 – 3+00 (2000 m ²)	Žemės sankasos pagerinimas, naudojant geotekstilę su geotinklu, užpilant 29 cm smėlio	Naujai statoma Naujoji gatvė priskiriama ypatingiems statiniams. Gatvės kategorija – C; Važiuojamosios dalies plotis – 6,50 m; Eismo juostų skaičius – 2; Ruožo ilgis (bendras) – 2,745 km

17 pav. pateiktas II tiriamojo objekto skersinis konstrukcijos profilis. Kelio konstrukcija susideda iš: žemės sankasos iš geotekstilės su geotinklu, 29 cm atsparaus šalčiui apsauginio sluoksnio, 38 cm atsparaus šalčiui apsauginio sluoksnio, skaldos pagrindo iš nesurišto mineralinių medžiagų mišinio fr. 0/45 – 20 cm, asfalto pagrindo dangos sluoksnio AC 32 PS – 10 cm, asfalto dangos sluoksnio iš AC 16 AS – 4 cm ir asfalto dangos sluoksnio iš SMA 8 S – 3 cm.



17 pav. Antrojo tiriamojo objekto skersinis konstrukcijos profilis [66]

Žemės sankasos stiprinimas atliekamas važiuojamajai kelio daliai. Remiantis geologinių tyrinėjimų ataskaita, projektuojamą žemės sankasą sudaro SD, SD0 (dulkingi, molingi, žvyringi smėliai) gruntai. [66] KPT SDK 19 73 punktas nurodo, kad naudojant DK 100–DK 2 dangų konstrukcijų klasę, naudojant F2 arba F3 klasės gruntuos sankasos įrengimui, reikalingas grunto pakeitimas arba pagerinimas pagal MN GPSR 12. [68] Sankasos gerinimui naudojama neaustinė geotekstilė > 170 g/m², geotinklas iš PP 50/50 kN/m ir apsauginis šalčiui atsparus sluoksnis fr. ≥ 0/16 [68].

Sankasos įrengimas prasideda nuo apatinės sankasos įrengimo dalies, kai esamas gruntas sutankinamas gruntiniu volu ir suprofiluojamas autogreideriu iki projekcinio aukščio, skersinio ir išilginio profilio. Ant įrengto pagrindo visu sankasos plokščiame klojama geotekstilė ir armuojantis geotinklas (žr. 18 pav.). Geotekstilės ir geotinklo minimalus užleidimas – 0,5 m. [45]



18 pav. Geotekstilės su geotinklu paklojimas [sudaryta autoriaus]

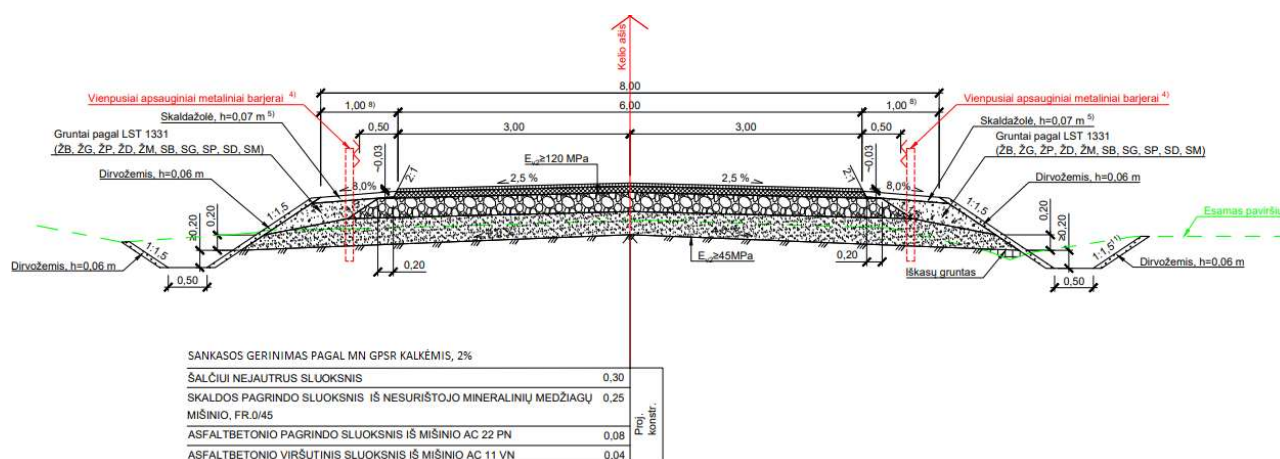
Ant jų užpilamas 29 cm. storio smėlio fr. ≥ 0/16 sluoksnis. Sluoksnis sutankinamas gruntiniu volu ir suprofiluojamas autogreideriu iki projekcinio aukščio, skersinio ir išilginio profilio.

III Tiriamasis objektas. 8 lentelėje pateikta informacija apie III tiriamąjį objektą.

8 lentelė. Trumpa informacija apie III tiriamąjį objektą.

Objekto pavadinimas	Tiriama kelio atkarpa	Sankasos gerinimo būdas	Bendri statinio duomenys ir parametrai
Valstybinės reikšmės rajoninio kelio Nr. 4512 Skaudvilė – Adakavas – Nemakščiai ruožas nuo 6,428 iki 12,180 km	Pk. 85+00 – 87+00 (2000 m ²)	Žemės sankasos pagerinimas, naudojant 2 % kalkes	Remontuojamo rajoninio kelio atkarpa yra priskiriama ypatingiems statiniams. Kategorija – V; Važiuojamosios dalies plotis – 6,00 m; Eismo juostų skaičius – 2; Ruožo ilgis (bendras) – 5,77 km

Remontuojamo kelio ruože 8,50 km iki 8,70 km (pagal inžinerinius geologinius tyrinėjimus) įrengiant sankasą gali būti pasiekti molingi gruntai. Grunto pagerinimas atliekamas pagal MN GPSR 12 reikalavimus, todėl atliekamas Proktoro tankio bandymas, kuriame nustatyta, kad žemės sankasos stiprinimui efektyviausias 2 % kalkių [69]. 19 pav. pateiktas III tiriamojo objekto skersinis konstrukcijos profilis.



19 pav. Trečiojo tiriamojo objekto skersinis konstrukcijos profilis [69]

Kelio konstrukcija susideda iš: žemės sankasos pagerintos 2 % kalkėmis, 30 cm šalčiui nejautraus sluoksnio, skaldos pagrindo iš nesurišto mineralinių medžiagų mišinio *fr.* 0/45 – 25 cm, asfalto pagrindo dangos sluoksnio AC 22 PN – 8 cm ir asfalto dangos sluoksnio AC 11 VN – 4 cm.

Sankasos įrengimas prasideda nuo kalkių paskleidimo ant grunto. Paskleistos kalkės frezuojamos traktorine freza (žr. 20 pav.).



20 pav. Sankasos frezavimas [sudaryta autoriaus]

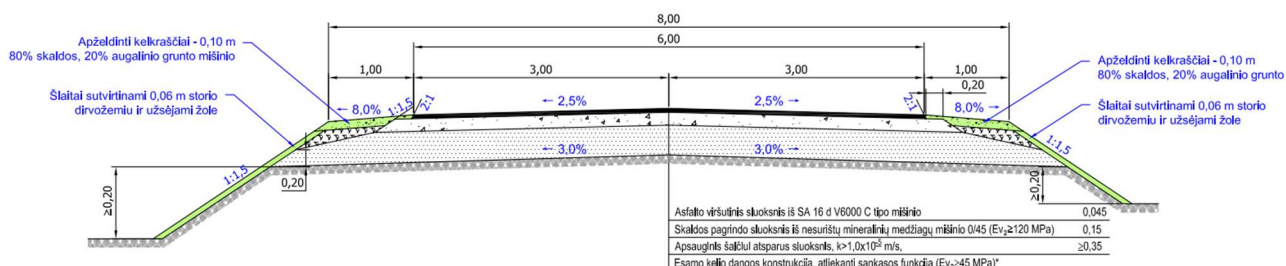
Kalkės sumaišytos su gruntu tankinamos gruntiniu volu ir laistomos vandenveže. Sutankinus gruntą, autogreideris suprofiliuoja sankasą iki projekcinio aukščio, skersinio ir išilginio profilio.

IV Tiriamasis objektas. 9 lentelėje pateikta informacija apie IV tiriamąjį objektą.

9 lentelė. Trumpa informacija apie IV tiriamąjį objektą.

Objekto pavadinimas	Tiriama kelio atkarpa	Sankasos gerinimo būdas	Bendri statinio duomenys ir parametrai
Valstybinės reikšmės rajoninio kelio nr. 1716 Pilis–Raudonėnai ruožas nuo 2,900 iki 3,770 km.	Pk. 30+00 – 32+00 (2000 m ²)	Žemės sankasa be priedų (natūrinis esamas gruntas)	Remontuojamo rajoninio kelio atkarpa yra priskiriama ypatingiems statiniams. Kategorija – V; Važiuojamosios dalies plotis – 6,00 m; Eismo juostų skaičius – 2; Ruožo ilgis (bendras) – 0,862 km.

21 pav. pateiktas IV tiriamojo objekto skersinis konstrukcijos profilis. Kelio konstrukcija susideda iš: esamos kelio konstrukcijos, kuri atlieka sankasos funkciją, 35 cm apsauginio šalčiui atsparaus sluoksnio, 15 cm. skaldos pagrindo iš nesurišto mineralinių medžiagų mišinio *fr.* 0/45 ir asfalto dangos sluoksnio SA 16 d V6000 – 4,5 cm.



21 pav. Ketvirtojo tiriamojo objekto skersinis konstrukcijos profilis [70]

Esama kelio danga prieš kapitalinį remontą – žvyro danga. Esama danga suprofiliuojama 3 % skersiniu nuolydžiu. Žemės sankasa papildomai nestiprinama [70].

Sankasos įrengimas be priedų paprastesnis. Esamas gruntas profiliuojamas autogreideriu (žr. 22 pav.).



22 pav. Sankasos profiliavimas [sudaryta autoriaus]

Atlikus profiliavimą, gruntiniais volais tankinamas pagrindas. Sankasa įrengta, kai projektiniai aukščiai, skersiniai ir išilginiai profiliai atitinka projektinius sprendinius.

3.2. Statinio apkrovimo plokšte bandymo rezultatai

Iš kiekvieno tiriamojo objekto, tiriamame ruože atlikti laboratoriniai statinio apkrovimo plokšte bandymai. Atliktų bandymų skaičius– 2. Iš jų imamas vidurkis.

10 lentelė. Statinio apkrovimo plokšte bandymo rezultatai

Eil. Nr.	Vieta (piktetas, km ar kita)	Atstumas nuo kelio ašies	Pirmasis apkrovimo ciklas				Antrasis apkrovimo ciklas				E_{v2}/E_{v1}
			σ_{max} , MN/m ²	a_1 , mm/(MN/m ²)	a_2 , mm/(MN) ² /m ⁴	E_{v1} , MN/m ²	σ_{max} , MN/m ²	a_1 , mm/(MN/m ²)	a_2 , mm/(MN) ² /m ⁴	E_{v2} , MN/m ²	
I Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas su 2% cementu)											
1.	Pk. 83+18	1,3m. k.p.	0,50	0,61	2,46	122,40	0,42	1,97	-2,14	251,00	2,05
2.	Pk. 84+09	3,7m. d.p.	0,50	1,35	-0,04	169,47	0,42	1,28	-0,97	282,29	1,67
II Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas su geotekstile ir geotinklu, užpilant 29 cm smėlio)											
3.	Pk. 1+50	2,2m. k.p.	0,50	5,77	0,58	37,10	0,42	5,58	-5,73	82,90	2,23
4.	Pk. 2+26	0,5m. d.p.	0,50	6,69	-1,46	37,80	0,42	3,32	-0,86	77,80	2,06
III Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas su 2% kalkėmis)											
5.	Pk. 70+02	1,5m. k.p.	0,50	-0,75	5,88	102,90	0,42	1,90	-1,78	222,20	2,16

6.	Pk. 71+60	3,5m. d.p.	0,50	3,29	-2,04	99,00	0,42	2,64	-3,06	203,10	2,05
IV Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas be priedų)											
7.	Pk. 30+58	1,9m. k.p.	0,50	8,21	0,13	27,20	0,42	6,20	-5,56	65,80	2,42
8.	Pk. 31+27	2,9m. d.p.	0,50	8,06	1,17	26,00	0,42	5,56	-2,37	51,4	1,98

Apskaičiuojamas deformacijos modulio E_{v2} vidurkis kiekviename tirtame ruože:

I Tiriamasis objektas

$$\overline{x_{1-2}} = \frac{251 + 282,29}{2} = 266,645 \text{ MN/m}^2;$$

II Tiriamasis objektas

$$\overline{x_{3-4}} = \frac{82,90 + 77,80}{2} = 80,35 \text{ MN/m}^2;$$

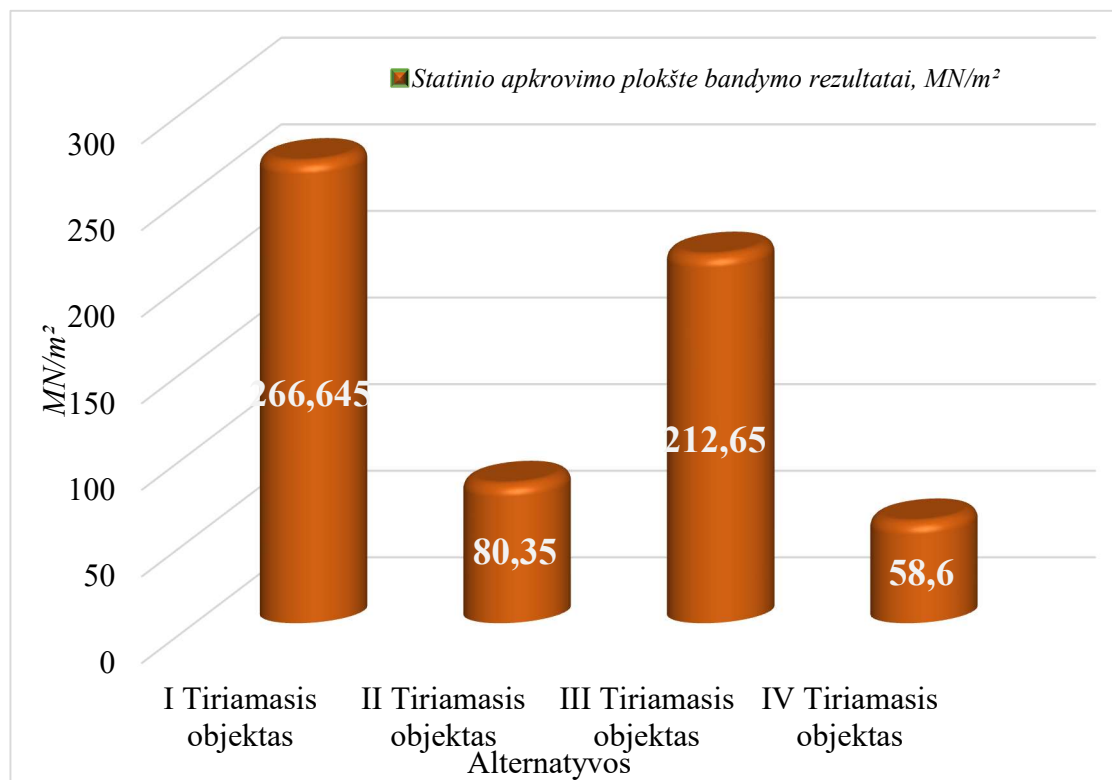
III Tiriamasis objektas

$$\overline{x_{5-6}} = \frac{222,20 + 203,10}{2} = 212,65 \text{ MN/m}^2;$$

IV Tiriamasis objektas

$$\overline{x_{7-8}} = \frac{65,80 + 51,40}{2} = 58,60 \text{ MN/m}^2.$$

Apskaičiavus deformacijos modulio E_{v2} vidurkius, nustatyta tiriamųjų objektų grunto laikomoji geba (žr. 23 pav.).



23 pav. Grafinis statinio apkrovimo plokšte bandymo rezultatų pateikimas

Didžiausia reikšmė gauta I tiriamajame objekte – $266,645 \text{ MN/m}^2$, mažiausia reikšmė nustatyta IV tiriamajame objekte – $58,60 \text{ MN/m}^2$.

3.3. Kainų rezultatai

Racionaliam kainų palyginimui, tiriamų objektų kaina sudaryta pagal 2022.11 galiojančius vidinius kelių ir tiltų statybos įmonės medžiagų, mechanizmų, žmogaus darbo užmokesčio kainynus. Kaina susideda iš: mechanizmų, žmogaus darbo užmokesčio ir medžiagų kainos. Detali kainos analizė, kai skaičiuojama 2000 m^2 kiekvienai technologijai, pateikta žemiau.

I Tiriamojo objekto kaina susideda iš (žemės sankasa įrengiama su 2 % cementu):

1. mechanizmų kaina – 4138,76 EUR.;
2. žmogaus darbo užmokestis – 2606,10 EUR.;
3. medžiagų kaina – 3603,60 EUR. (Naudojamas portlandcementis CEM II 42,5. 1 t – 143,00 EUR.)

Bendra kaina: $4137,76 + 2606,10 + 3603,60 = 10348,46 \text{ EUR}$.

II Tiriamojo objekto kaina susideda iš (žemės sankasos įrengimas su geotekstile ir geotinklu, užpilant 29 cm smėlio):

1. mechanizmų kaina – 1436,22 EUR.;
2. žmogaus darbo užmokestis – 6722,24 EUR.;
3. medžiagų kaina – 7693,50 EUR. (Naudojama geotekstilė $>170 \text{ g/m}^2$, $1 \text{ m}^2 = 0,76 \text{ EUR}$., geotinklas Enkagrid MAX 50, $1 \text{ m}^2 = 2,63 \text{ EUR}$., smėlis *fr. 0/16*, $1 \text{ m}^3 = 15,00 \text{ EUR}$.)

Bendra kaina: $1436,22 + 6722,24 + 7693,50 = 15851,96 \text{ EUR}$.

III Tiriamojo objekto kaina susideda iš (žemės sankasos įrengimas su 2% kalkėmis):

1. mechanizmų kaina – 4984,31 EUR.
2. Žmogaus darbo užmokestis – 2597,70 EUR.
3. Medžiagų kaina – 6552,00 EUR. (Naudojamos negesintos kalkės. 1 t – 260,00 EUR.)

Bendra kaina: $4984,31 + 2597,70 + 6552,00 = 14134,01 \text{ EUR}$.

IV Tiriamojo objekto kaina susideda iš (žemės sankasos įrengimas be priedų):

4. mechanizmų kaina – 589,92 EUR.;
5. žmogaus darbo užmokestis – 259,71 EUR.;
6. medžiagų kaina – 0 EUR.

Bendra kaina: $589,92 + 259,71 + 0 = 849,63 \text{ EUR}$.

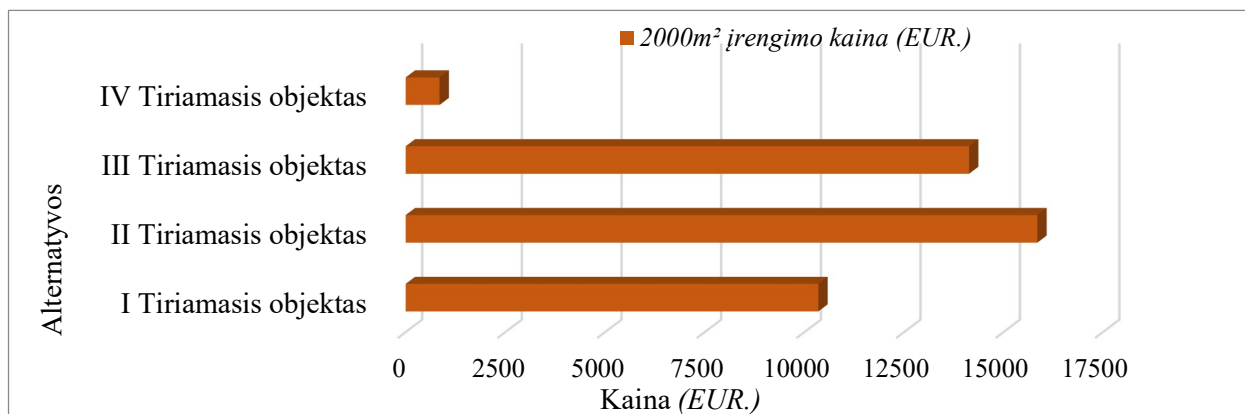
Bendra analizuojamų technologijų įrengimo kaina pateikta 11 lentelėje.

11 lentelė. Sankasos įrengimo kaina

Alternatyvos	2000 m ² įrengimo kaina (EUR.)
I Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas su 2 % cementu)	10348,46
II Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas su geotekstile ir geotinklu, užpilant 29 cm smėlio)	15851,96

III Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas su 2 % kalkėmis)	14134,01
IV Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas be priedų)	849,63

24 pav. grafiškai pateiktas kainų palyginimas, kuriame matomas žymus kainų pokytis priklausantis nuo įrenginėjamos sankasos technologijos.



24 pav. Grafinis kainų palyginimas

Atlikus skaičiavimus nustatyta, kad žemės sankasos įrengimas be priedų yra pigiausias. Sankasos įrengimas su 2 % cementu yra 12,18 karto brangesnis. Sankasos įrengimas su kalkėmis 1,37 karto brangesnis už sankasą su 2 % cementu. Sankasos įrengimas su geotekstilė su geotinklu, užpilant 29 cm smėlio yra pats brangiausias. 1,12 karto brangesnis už sankasos įrengimą su 2 % kalkėmis ir 18,66 karto brangesnis už sankasą be priedų.

Sankasos įrengimas be priedų pigiausias todėl, kad nereikia jokių medžiagų, o mechanizmų ir žmogaus darbo užmokesčiai yra mažesni apie 8,80 karto palyginant su kitomis technologijomis.

3.4. Mechanizmų ir žmogaus darbo sąnaudų rezultatai

Pagal apskaičiuotas „Sistelos“ normas, gautas mechanizmo darbo sąnaudų žiniaraštis (žr. 12 lent.), kuriame išsamiai nurodyti reikalingi mechanizmai ir jų darbų atlikimo trukmė.

12 lentelė. Mechanizmų darbo sąnaudų žiniaraštis

Tiriamasis objektas	Mechanizmas	Mechanizmo darbo sąnaudos (val.)	Bendros mechanizmų darbo sąnaudos (val.)
I Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas su 2 % cementu)	Autogreideris su niveliavimu	17,18	62,18
	Grunto volas	9,00	
	Vandenvėžė	18,00	
	Traktorius	9,00	
	Cemento paskleistuvai	9,00	
II Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas su geotekstile ir geotinklu, užpilant 29 cm smėlio)	Autogreideris su niveliavimu	10,50	31,96
	Grunto volas	12,00	
	Vibroplokštė	2,46	
	Autosavivarčiai	7,00	
	Autogreideris su niveliavimu	17,18	62,18
	Grunto volas	9,00	

III Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas su 2 % kalkėmis)	Vandenvėžė	18,00	10,73
	Traktorius	9,00	
IV Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas be priedų)	Autogreideris su niveliavimu	3,50	
	Grunto volas	6,00	
	Vibroplokštė	1,23	

Didžiausios mechanizmų sąnaudos pastebimos sankasos įrengimui su cementu ir kalkėmis. 62,18 h. arba 7,77 d.d. Mažiausias– sankasa be priedų. 10,73 h. arba 1,34 d.d.

Pagal apskaičiuotas „Sistelos“ normas, gautas žmogaus darbo sąnaudų žiniaraštis (žr. 13 lent.), kuriame nurodomas valandų kiekis reikalingas darbui atlikti.

13 lentelė. Žmonių darbo sąnaudų žiniaraštis

Tiriamasis objektas	Žmonių darbo sąnaudos (val.)
I Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas su 2 % cementu)	248,20
II Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas su geotekstile ir geotinklu, užpilant 29 cm smėlio)	696,76
III Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas su 2 % kalkėmis)	247,40
IV Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas be priedų)	27,55

Remiantis žiniaraščiu, didžiausias žmogaus darbo sąnaudos tenka sankasos įrengimui su geosintetika. 696,76 h. arba 87,10 d.d. Mažiausias kiekis valandų– sankasai be priedų. 27,55 h arba 3,44 d.d.

3.5. Technologinė pertrauka

Ekonomiškam darbų atlikimui, technologinė pertrauka – svarbus aspektas. Žemiau pateiktoje 14 lent., pateiktas technologinių pertraukų poreikis.

14 lentelė. Technologinės pertraukos poreikis

Tiriamasis objektas	Technologinė pertrauka (paromis)
I Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas su 2 % cementu)	7 (Pagal MN GPSR 12)
II Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas su geotekstile ir geotinklu, užpilant 29 cm smėlio)	0 (Pagal MN GEOSINT ŽT 13)
III Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas su 2 % kalkėmis)	7 (Pagal MN GPSR 12)
IV Tiriamasis objektas (žemės sankasos įrengimas be priedų)	0 (Pagal IT ŽS 17)

Pagal MN GPSR 12 reikalavimus žemės sankasos įrengimui su cementu ir kalkėmis reikalinga minimali 7 parų technologinė pertrauka. Todėl, po jos įrengimo, 7 paras draudžiama vykdyti darbus. Pagal MN GEOSINT ŽT 13 ir IT ŽS 17 sankasai su geosintetika ir sankasai be priedų, papildomos technologinės pertraukos daryti nereikia. Atlikus sankasos įrengimo darbus pagal reikalavimus, galimi vykdyti kitus darbus.

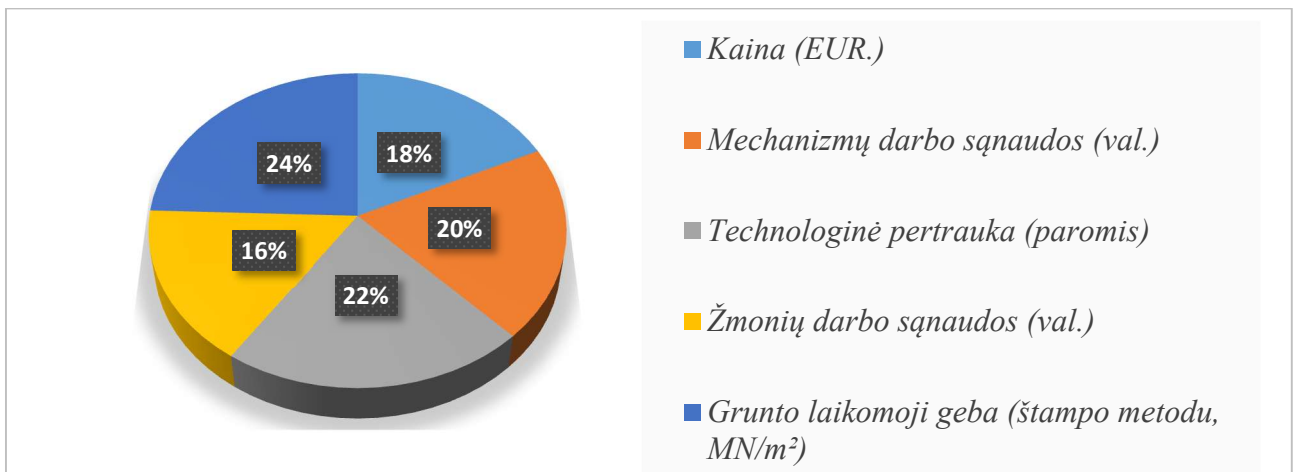
3.6. Ekspertų apklausos rezultatai

Atlikta ekspertų apklausa, kurioje dalyvavo 13 kelių ir tiltų statybos įmonės ekspertų, kurių darbo patirtis daugiau kaip 5 metai. 8 korespondentai yra darbų vadovai, 2 meistrai ir 3 projektų vadovai. Žemiau pateiktoje lentelėje (žr. 15 lent.) pateikti korespondentų atsakymai. Atlikus apklausą, reikia patikrinti jos suderinamumą.

15 lentelė. Atlikta ekspertų apklausa

Ekspertas	Rodiklių svarba vertinama balais				
	Kaina, EUR.	Mechanizmų darbo sąnaudos, val.	Technologinė pertrauka, paromis	Žmonių darbo sąnaudos, val.	Grunto laikomoji geba (štampos metodu), MN/m ²
Ekspertas nr. 1	6	8	9	7	10
Ekspertas nr. 2	8	9	8	6	9
Ekspertas nr. 3	6	7	9	6	10
Ekspertas nr. 4	9	8	8	5	8
Ekspertas nr. 5	7	6	8	7	9
Ekspertas nr. 6	6	8	9	7	10
Ekspertas nr. 7	8	9	8	6	9
Ekspertas nr. 8	6	7	9	5	10
Ekspertas nr. 9	6	7	9	6	10
Ekspertas nr. 10	7	6	7	8	10
Ekspertas nr. 11	6	8	9	7	10
Ekspertas nr. 12	8	9	8	6	9
Ekspertas nr. 13	7	8	8	5	9
	Rangų sumos				
	90	100	109	81	123
	Vidutinis rangas				
	12,86	14,29	15,57	11,57	17,57
	Prioritetas				
	4	3	2	5	1
	Rodiklio subjektyvus reikšmingumas (santykinis svoris)				
	0,1789	0,1988	0,2167	0,1610	0,2446

Ekspertų apklausa nustatė subjektyvų lyginamųjų rodiklių reikšmingumą: 25 pav. grafiškai pateikta procentinė reikšmingumo dalis.



25 pav. Grafinis santykinio svorio pateikimas

Ekspertų apklausos suderinamo skaičiavimai prasideda nuo kiekvieno efektyvumo rodiklio nuokrypio kvadratų sumos nustatymo pagal 9 formulę:

$$\begin{aligned}
 S &= \left(90 - \frac{1}{5} * (90 + 100 + 109 + 81 + 123)\right)^2 \\
 &+ \left(100 - \frac{1}{5} * (90 + 100 + 109 + 81 + 123)\right)^2 + \left(109 - \frac{1}{5} * (90 + 100 + 109 + 81 + 123)\right)^2 \\
 &+ \left(81 - \frac{1}{5} * (90 + 100 + 109 + 81 + 123)\right)^2 + \left(123 - \frac{1}{5} * (90 + 100 + 109 + 81 + 123)\right)^2 \\
 &= 1069,2;
 \end{aligned}$$

Nustačius kiekvieno efektyvumo rodiklio nuokrypio kvadratų sumą, skaičiuojamas Konkordacijos koeficientas (kai susijusių rangų nėra) pagal 10 formulę:

$$\bar{W} = \frac{12 * 1069,2}{13^2 * (5^3 - 5)} = 0,63266$$

Konkordacijos koeficiento reikšmės nustatymas pagal 11 formulę:

$$X^2 = \frac{12 * 1069,2}{13 * 5 * (5 + 1)} = 32,898$$

Norminės X_{lent}^2 reikšmės (pagal 14 pav.) nustatymas:

kai, $v = 5 - 1 = 4$; reikšmingumo lygis – 0,01

Reikšmė – 13,28

$32,898 > 13,28$

Išvada: ekspertų nuomonės suderintos.

3.7. Daugiakriteris MOORA vertinimas

Skaičiavimai atlikti remiantis 2.5. skyriaus metodika. Daugiakriteris vertinimas MOORA metodu atliktas etapais. Pirmajame etape sudaroma alternatyvų lyginamųjų kriterijų matrica (žr. 16 lent.), kai tiriamos keturios skirtingos technologijos:

1. sankasos įrengimas su 2 % cementu;
2. sankasos įrengimas su geotekstilė ir geotinklu, užpilant 29 cm smėlio;

3. sankasos įrengimas su 2 % kalkėmis;
4. sankasos įrengimas be priedų.

Alternatyvos vertinamos pagal penkis lyginamuosius kriterijus:

- kaina (EUR./2000 m²);
- mechanizmų darbo sąnaudos (val./2000 m²);
- žmonių darbo sąnaudos (val./2000 m²);
- technologinė pertrauka (paromis);
- grunto laikomoji geba (štampos metodu, MN/m²).

16 lentelė. skirtingų alternatyvų ir tikslų matrica

Alternatyvos	Minimizuojami rodikliai				Maksimizuojami rodikliai
	Kaina, EUR.	Mechanizmų darbo sąnaudos, val.	Technologinė pertrauka, paromis	Žmonių darbo sąnaudos, val.	Grunto laikomoji geba (štampos metodu), MN/m ²
I objektas	10348,46	62,18	7	248,2	266,65
II objektas	15851,96	31,96	0	696,76	80,35
III objektas	14134,01	62,18	7	247,4	212,65
IV objektas	849,63	10,73	0	27,55	58,6
Minimali reikšmė					Maksimali reikšmė
	849,63	10,73	0	27,55	266,65
Reikšmingumas					
	0,1789	0,1988	0,2167	0,161	0,2446

Iš lyginamųjų kriterijų išrenkami minimali/maksimali reikšmė (16 lent. 5 eil.). Kaina, mechanizmų darbo sąnaudos, žmonių darbo sąnaudos, technologinė pertrauka yra minimizuojantis rodiklis, todėl minimali reikšmė yra geriausia. Grunto laikomoji geba yra maksimizuojamasis rodiklis, todėl maksimali reikšmė yra geriausia. Išrinkus minimalias/maksimalias reikšmes, išdėstomas lyginamųjų kriterijų reikšmingumas (16 lent. 6 eil.), kuris nustatytas atlikus ekspertų apklausą (3.6 sk.).

Antrajame etape atliekama alternatyvų ir lyginamųjų kriterijų matricos skaičiavimo dalis, kurioje reikalinga kvadratinės sumos šaknis (žr. 17 lent.), tolimesniems skaičiavimams atlikti.

17 lentelė. skirtingų alternatyvų ir tikslų matricos kvadratinės sumos šaknis

Alternatyvos	Minimizuojami rodikliai				Maksimizuojami rodikliai
	Kaina, EUR.	Mechanizmų darbo sąnaudos, val.	Technologinė pertrauka, paromis	Žmonių darbo sąnaudos, val.	Grunto laikomoji geba (štampos metodu), MN/m ²
I objektas	107090624,4	3866,3524	49	61603,24	71102,2225
II objektas	251284635,8	1021,4416	0	485474,4976	6456,1225
III objektas	199770238,7	3866,3524	49	61206,76	45220,0225
IV objektas	721871,1369	115,1329	0	759,0025	3433,96
Kvadratinės sumos šaknis					
	23640,37584	94,17685119	9,899494937	780,412391	355,2637436

16 lentelėje pateiktos lyginamųjų kriterijų reikšmės, 17 lentelėje pakeliamos kvadratu. Kiekvieno lyginamojo kriterijaus kvadratinės sumos šaknis (17 lent. 5 eil.) sudaryta iš 17 lentelės 1 – 4 eilučių, sudėjus gautas reikšmes ir ištraukus iš jų šaknį.

Trečiajame etape sudaroma normalizuota alternatyvų ir lyginamųjų kriterijų matrica (žr. 18 lent.).

18 lentelė. Sudaryta normalizuota matrica

Alternatyvos	Minimizuojami rodikliai				Maksimizuojami rodikliai
	Kaina, EUR.	Mechanizmų darbo sąnaudos, val.	Technologinė pertrauka, paromis	Žmonių darbo sąnaudos, val.	Grunto laikomoji geba (štampos metodu), MN/m ²
I objektas	0,437745156	0,660247176	0,707106781	0,31803698	0,750569133
II objektas	0,670546023	0,339361527	0	0,892810017	0,226169998
III objektas	0,597875858	0,660247176	0,707106781	0,317011881	0,598569384
IV objektas	0,035939784	0,11393458	0	0,035301849	0,164947876
Reikšmingumas					
	0,1789	0,1988	0,2167	0,161	0,2446

Normalizuotos matricos reikšmės (18 lent. 1 – 4 eil.) gaunamos, imant 17 lent. 1 – 4 eil. reikšmes, jas dalinant iš kvadratinės sumos šaknies (17 lent. 5 eil.). Reikšmės apvalinamos 10^{-9} .

Ketvirtajame etape sudaroma svartinė normalizuota matrica (žr. 19 lent.).

19 lentelė. Sudaryta svartinė normalizuota matrica

Alternatyvos	Minimizuojami rodikliai				Maksimizuojami rodikliai
	Kaina, EUR.	Mechanizmų darbo sąnaudos, val.	Technologinė pertrauka, paromis	Žmonių darbo sąnaudos, val.	Grunto laikomoji geba (štampos metodu), MN/m ²
I objektas	0,078312608	0,131257138	0,153230039	0,051203954	0,18358921
II objektas	0,119960683	0,067465072	0	0,143742413	0,055321181
III objektas	0,106959991	0,131257138	0,153230039	0,051038913	0,146410071
IV objektas	0,006429627	0,022650195	0	0,005683598	0,040346251

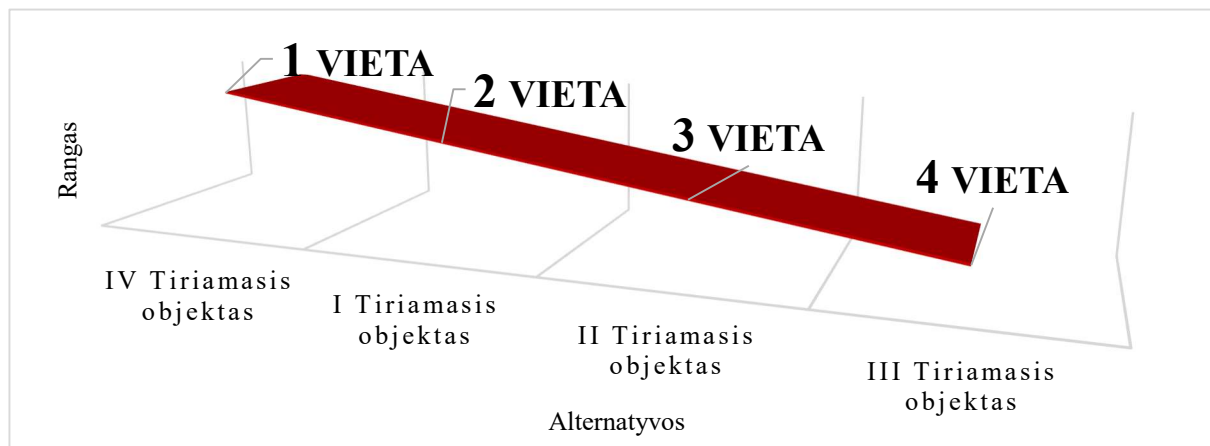
Svartinės normalizuotos matricos reikšmės (19 lent. 1 – 4 eil.), gaunamos imant normalizuotos matricos reikšmes (18 lent. 1 – 4 eil.) ir jas dauginant iš reikšmingumo (18 lent. 5 eil.).

Atlikus skaičiavimus, sudaromas reitingavimo sąrašas (žr. 20 lent.).

20 lentelė. Sudarytas rango sąrašas pagal naudingumo laipsnį

Alternatyvos	Naudingumo laipsnis Y_i	Rangas
I objektas	-0,23041453	2
II objektas	-0,275846986	3
III objektas	-0,296076011	4
IV objektas	0,005582831	1

Reitingavimas sudaromas pagal naudingumo laipsnį Y_i . Jis apskaičiuojamas taip: svertinės normalizuotos matricos (19 lent.) maksimizuojamą rodiklį (grunto laikomąją gebą) atėmus iš minimizuojamųjų rodiklių (kaina, mechanizmų darbo sąnaudos, technologinė pertrauka, žmonių darbo sąnaudos). Gauta didžiausia reikšmė yra aukščiausioje vietoje pagal reitingavimą, o mažiausia – žemiausioje. 26 pav. grafiškai pavaizduotas reitingavimas pagal rangą ir alternatyvą.



26 pav. Tiriamųjų objektų grafinis rangų pateikimas

Dalinė išvada:

Atlikus daugiakriterį vertinimą nustatyta, kad efektyviausias – IV tiriamasis objektas, kuriame įrenginama sankasa be priedų. Ši alternatyva surinko 0,0056 santykinio efektyvumo balų. Antroje vietoje – I tiriamasis objektas, kuriame sankasa pagerinta, panaudojant 2 % cementą. Trečioje vietoje – II tiriamasis objektas, kuriame sankasa pagerinta, panaudojant geotekstilę su geotinklu ir užpilant 29 cm smėlio. Ketvirtoje vietoje – III tiriamasis objektas, kuriame sankasa pagerinta, panaudojant 2 % kalkes.

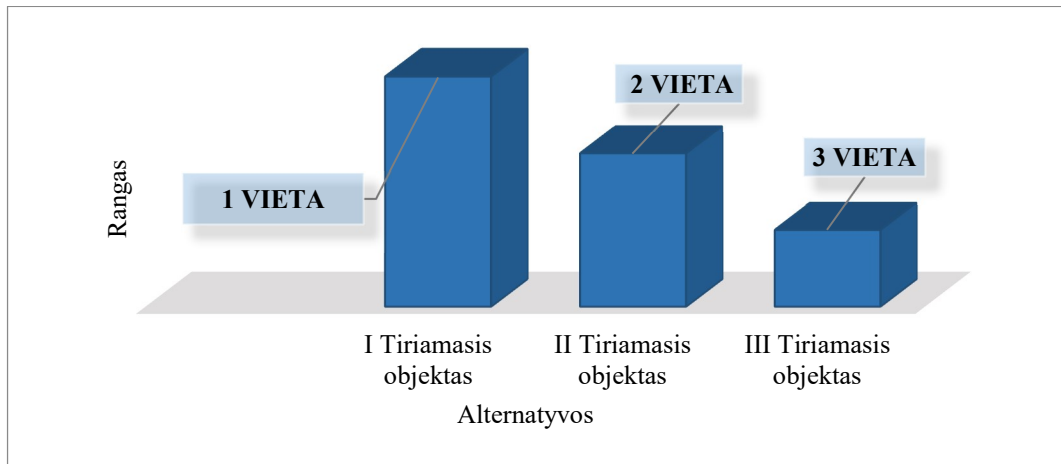
Nustatytas ryškus IV tiriamojo objekto (41,272 karto, lyginant santykinu efektyvumo balu) efektyvumas lyginant su I tiriamuoju objektu. IV tiriamojo objekto efektyvumą lemia žemiausia kaina, mažiausios mechanizmų, žmonių darbo sąnaudos ir nereikalinga technologinė pertrauka. Nors sankasos įrengimas be priedų yra efektyviausias pagal MOORA metodą, tačiau remiantis KPT SDK 19 antruoju skirsniu [71] F2 ir F3 klasių gruntai turi būti sustiprinti pagal MN GPSR 12 reikalavimus [42]. Įvertinus galiojančius reglamentus ir siekiant tvarumo, racionalu IV tiriamojo objekto nereitinguoti.

3.7.1. Pagerintos sankasos reitingavimas

Nevertinant IV tiriamojo objekto, kinta rango sąrašas (žr. 21 lent.). Reitinguojami I-III tiriamieji objektai (žr. 27 pav.), kuriuose žemės sankasa yra gerinama naudojant cementą, geosintetiką ir kalkes.

21 lentelė. Sudarytas I-III tiriamojo objekto rango sąrašas pagal naudingumo laipsnį

Alternatyvos	Naudingumo laipsnis Y_i	Rangas
I objektas	-0,23041453	1
II objektas	-0,275846986	2
III objektas	-0,296076011	3



27 pav. I-III tiriamųjų objektų grafinis rangų pateikimas

Pagal naudingumo laipsnį Y_i efektyviausias – I tiriamasis objektas, kurio sankasa pagerinta panaudojant 2 % cementą. Ši alternatyva surinko -0,23 santykinio efektyvumo balų. Antroje vietoje – II tiriamasis objektas, kuriame sankasa pagerinta, panaudojant geotekstilę su geotinklu ir užpilant 29 cm smėlio. Ši alternatyva surinko -0,276 santykinio efektyvumo balų. Trečioje vietoje – III tiriamasis objektas, kuriame sankasa pagerinta, panaudojant 2 % kalkes. Ši alternatyva surinko -0,296 santykinio efektyvumo balų.

Išvados

1. Atlikus automobilių kelių žemės sankasos įrengimo technologijų tyrimą, atliktame statinio apkrovimo plokšte laboratoriniame bandyme nustatyta, kad didžiausias deformacijos modulis E_{v2} priklauso sankasai su 2 % cemento. 20 % mažesnis rezultatas nustatytas sankasai su 2 % kalkėmis. Sankasos įrengimo su geosintetika yra 62,2 % prastesni rezultatai, palyginus su sankasai su 2 % kalkėmis. Sankasos be priedų deformacijos modulis yra pats mažiausias – 27,07 % mažesnis už sankasos įrengimą su geosintetika ir 78,10 % mažesnis už sankasos įrengimą su 2 % cemento.
2. Atlikus automobilių kelių žemės sankasos įrengimo daugiakriterį vertinimą MOORA metodu iš penkių kriterijų kai vertinamos keturios technologijos, nustatyta, kad efektyviausias – IV tiriamasis objektas t. y. žemės sankasos įrengimas be priedų. Ši alternatyva surinko 0,0056 santykinio efektyvumo balų.
3. Dėl atnaujintų norminių reikalavimų žemės sankasai, apie 70% projektuojamų susisiekimo statinių (projektuotojų duomenimis), reikalingas žemės sankasos pagerinimas. Todėl atmetus IV tiriamąjį objektą, kuriame sankasa nėra gerinama, priimama, kad pagal lyginamuosius kriterijus ir didžiausią deformacijos modulio reikšmę, racionaliausias - I tiriamasis objektas, kuriame žemės sankasa gerinama su 2 % cemento. II Tiriamasis objektas – 19 % mažesniu rezultatu, lyginant su I tiriamuoju objektu. III tiriamasis objektas mažiausiai efektyvus – 7,30 % mažesniu rezultatu, lyginant su II tiriamuoju objektu ir 28,50 %, lyginant su I tiriamuoju objektu.
4. Įvertinus didžiausią grunto laikomąją gebą, daugiakriterio vertinimo rezultatus, I tiriamasis objektas, kuriame žemės sankasa gerinama su 2 % cementu, yra tvariausias ir racionaliausias sprendimas iš tiriamųjų objektų. Ši alternatyva surinko -0,23 santykinio efektyvumo balų.

Literatūros sąrašas

1. LIU, Y. et al. Review on evolution and evaluation of asphalt pavement structures and materials. *Journal of Traffic and Transportation Engineering* [interaktyvus]. 2020, 7(5), 573–599 [žiūrėta 2022-06-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.05.003>
2. AMAKYE, S. et al. Road Pavement Thickness and Construction Depth Optimization Using Treated and Untreated Artificially-Synthesized Expansive Road Subgrade Materials with Varying Plasticity Index. *Materials* [interaktyvus]. 2022, 15, 1–27 [žiūrėta 2022-05-28]. Prieiga per: doi: doi.org/10.3390/ma15082773.
3. *Automobilių kelių žemės darbų atlikimo ir žemės sankasos įrengimo taisyklės IT ŽS 17*, 2017 m. balandžio 3 d. Nr. V-111. (2017) [žiūrėta 2022-05-26]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/97ce2d81197111e7b6c9f69dc4ecf19f>
4. RADZISZEWSKI, P., et al. Future Trends in Road Pavement Technologies Development in the Context of Environmental Protection. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* [interaktyvus]. 2016, 11(2), 160–168 [žiūrėta 2022-06-08]. Prieiga per: Science Direct.
5. ZHANG, S., et al. Research on construction technology of road subgrade and bridge engineering. *Smart Construction Research* [interaktyvus]. 2018, 2(2), 1–4 [žiūrėta 2022-05-20]. Prieiga per: doi: 10.18063/scr.v2i2.585.
6. SUBROTO, H. *Asphalt Technology Integrated into Road Engineering for the Tropics*, 2014. ISBN 978-90-9028574-0.
7. KAMAL, I. and Y. BAS. Materials and technologies in road pavements – an overview. *Materials Today: Proceedings* [interaktyvus]. 2021, 4, 1–9 [žiūrėta 2022-05-28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.643>
8. ZHANG, D. Discussion on Construction Technology of Road Subgrade in Civil Engineering. *Civil Engineering* [interaktyvus]. 2020, 3(2), 47–50 [žiūrėta 2022-05-20]. Prieiga per: doi: 10.18282/ice.v3i2.355.
9. ROBINSON, Rob and Braiten THAGESEN. *Road Engineering for Development*. London: Spon Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, 2004. ISBN 0-203-34045-0.
10. JONES, Allan. *Guide to Pavement Technology*. Sydney: Austroads, 2018. ISBN 978-1-921551-58-1.
11. MODEER, V. *Subgrade Stability Manual* [interaktyvus]. 2005 [žiūrėta 2022-05-26]. Prieiga per: <https://idot.illinois.gov/Assets/uploads/files/Doing-Business/Manuals-Guides-&-Handbooks/Highways/Bridges/Geotechnical/Subgrade%20Stability%20Manual.pdf>
12. *Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice*. Washington: AASHTO, 2008. ISBN 978-1-56051-423-7.
13. ABIJA, F., OBORIE, E. and E. OBOHO. Site Investigation Studies for the Design of Raft-On-Pile Foundation for Elevated Water Tank in the Coastal Area of Opuama, Warri North, Western Niger Delta, Nigeria. *Journal of Mechanical and Civil Engineering* [interaktyvus]. 2019, 16(6), 58–66 [žiūrėta 2022-06-21]. Prieiga per: DOI: 10.9790/1684-1606045866.
14. KAZMEE, H. and E. TUTUMLUER. *Evaluation of Aggregate Subgrade Materials Used as Pavement Subgrade/Granular Subbase* [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2022-06-21]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/280310703_Evaluation_of_aggregate_subgrade_materials_used_as_pavement_subgrade_granular_subbase

15. ABIJA, F. Geotechnical assessment of subgrade and sub-base quality for the design and construction of road pavement in parts of the coastal section of Akwa Ibom State, Eastern Niger Delta, Nigeria. *International Journal of Scientific & Engineering Research* [interaktyvus]. 2020, 10(7), 1864–1877 [žiūrėta 2022-06-20]. Prieiga per: ResearchGate.
16. CYGAS, D., et al. A Test Road Section of Experimental Pavement Structures in Lithuania (I). *The 7th International Conference* [interaktyvus]. 2011, 5, 1130–1135 [žiūrėta 2022-05-18]. Prieiga per: Science Direct.
17. *Subgrade Construction* [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2022-06-20]. Prieiga per: https://www.in.gov/indot/files/Earthworks_Chapter_07.pdf
18. *Design Manual (Projektavimo vadovas)* [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-06-16]. Prieiga per: <https://iowasudas.org/manuals/design-manual/>
19. FAY, Laura, SHI, Xianming and Michelle AKIN. *Cost-Effective and Sustainable Road Slope Stabilization and Erosion Control*. Washington: Transportation research board, 2012. ISBN 978-0-309-22362-1.
20. *Subgrades and Subbases for Concrete Pavements*. Skokie: ACPA, 2007. ISBN 978-0-9800251-0-1.
21. ALBAYATI, A., ALLAWI, A. and N. OUKAILI. Evaluation and Re-design of Rigid Pavement Structure for the Power Plant Roadway. *Impact load* [interaktyvus]. 2017, 2, 1–44 [žiūrėta 2022-06-08]. Prieiga per: DOI:10.13140/RG.2.2.15923.02086
22. *Test Road – the Road of Experimental Pavement Structures* [interaktyvus]. 2011 [žiūrėta 2022-05-16]. Prieiga per: https://vilniustech.lt/files/2770/138/6/16_0/18.%2018.%2018_0.pdf
23. PING, L. Construction technology of rock-filled roadbed in highway engineering construction. International Workshop on Advances in Social Sciences [interaktyvus]. 2018, 7, 795–799 [žiūrėta 2022-05-20]. Prieiga per: DOI: 10.25236/iwass.2018.167
24. NAEINI, S., MOAYED, R. and F. ALLAHYARI. Subgrade Reaction Modulus (Ks) of Clayey Soils Based on Field Tests. *Journal of Engineering Geology* [interaktyvus]. 2014, 8(1), 1–27 [žiūrėta 2022-06-08]. Prieiga per: ResearchGate.
25. ADACHA, V. Geotechnical Assessment of Subgrade And Sub-Base Quality for The Design And Construction of Road Pavement In Parts of the Coastal Section of Kasese District, Western Region, Uganda. *International Journal of Academic Engineering Research* [interaktyvus]. 2020, 4(9), 9–17 [žiūrėta 2022-06-21]. Prieiga per: Science Direct.
26. JAIN, K., JHA, A. and K. SHIVANSHI. Improvement in Subgrade Soils with Marble Dust for Highway Construction: A Comparative Study. *Indian Geotechnical Journal* [interaktyvus]. 2020, 50, 307–317 [žiūrėta 2022-05-20]. Prieiga per: ResearchGate.
27. JAFFAR, S. et al. Evaluation of Conventional and Sustainable Modifiers to Improve the Stiffness Behavior of Weak Sub-Grade Soil. *Sustainability* [interaktyvus]. 2022, 14, 1–19 [žiūrėta 2022-06-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/su14052493>.
28. AMADI, A. et al. Case study of construction quality control monitoring and strength evaluation of a lateritic pavement using the dynamic cone penetrometer. *International Journal of Pavement Research and Technology* [interaktyvus]. 2018, 11, 530–539 [žiūrėta 2022-06-21]. Prieiga per: Science Direct.
29. ARSHAD, A. et al. Comparative Evaluation of Soil Subgrade Strength Using Laboratory and In-Situ Tests. *International Journal of Civil Engineering and Technology* [interaktyvus]. 2018, 9(7), 1184–1191 [žiūrėta 2022-05-28]. Prieiga per: ResearchGate.

30. ZHAO, X., WANG, J. and G. DING. Theoretical Analysis and Experimental Evaluation of Road Dynamic Behavior on Different Subgrades. *Civil Engineering* [interaktyvus]. 2019, 4, 1–19 [žiūrėta 2022-06-21]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1155/2019/3490360>
31. MOHOD, M. and K. KADAM. Comparative Study on Rigid and Flexible Pavement: A Review. *Journal of Mechanical and Civil Engineering* [interaktyvus]. 2016, 13(3), 84–88 [žiūrėta 2022-05-28]. Prieiga per: DOI: 10.9790/1684-1303078488
32. DHALE, Shrikrishna and Karin TAJNE. *Basics of Civil Engineering*. Deli: Reuters Publishers, 2014. ISBN 81-219-4288-8.
33. PURNAWAN, P. and S. UTAMI. The Influence of Base Course Types on Rigid Pavement Concrete Strength. *The 2nd Annual Applied Science and Engineering Conference* [interaktyvus]. 2017, 288, 1–7 [žiūrėta 2022-06-08]. Prieiga per: doi:10.1088/1757-899X/288/1/012120
34. MOKWA, R. and M. AKIN. *Measurement and Evaluation of Subgrade Soil Parameters* [interaktyvus]. 2009 [žiūrėta 2022-06-20]. Prieiga per: https://westerntransportationinstitute.org/wp-content/uploads/2016/08/4W2409_Final_Report.pdf.
35. SINGH, D., JHA, J. and K. GILL. Strength Evaluation of Soil Subgrade Using In-situ Tests. *Civil Engineering and Architecture* [interaktyvus]. 2016, 4(6), 201–212 [žiūrėta 2022-05-28]. Prieiga per: DOI: 10.13189/cea.2016.040601
36. RAHMAN, M., ISLAM, K. and S. GASSMAN. Estimation of Resilient Modulus for Coarse-Grained Subgrade Soils from Quick Shear Tests for Mechanistic-Empirical Pavement Designs. *Designs* [interaktyvus]. 2019, 3(48), 1–14 [žiūrėta 2022-06-08]. Prieiga per: doi:10.3390/designs3040048
37. AHMED, S., AL-RIDHA, D. and S. IBRAHIM. Evaluation of Subbase layer Performance on Design Life of Flexible Pavement. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* [interaktyvus]. 2017, 6(8), 17672–17680 [žiūrėta 2022-06-20]. Prieiga per: DOI:10.15680/IJIRSET.2017.0608320
38. KHAZANOVICH, L. et al. Evaluation of Subgrade Resilient Modulus Predictive Model for Use in Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board* [interaktyvus]. 2006, 1, 155–166 [žiūrėta 2022-06-20]. Prieiga per: ResearchGate.
39. ALHARBI, F. et al. Sustainability Evaluation of Cold In-Place Recycling and Hot Mix Asphalt Pavements: A Case of Qassim, Saudi Arabia. *Coatings* [interaktyvus]. 2022, 12, 1–17 [žiūrėta 2022-06-22]. Prieiga per: <https://doi.org/10.3390/coatings12010050>.
40. POZARYCKI, A. Condition assessment of lower roadway layers for pavement management systems. *Journal of Civil Engineering and Management* [interaktyvus]. 2016, 22(3), 311–321 [žiūrėta 2022-06-21]. Prieiga per: doi:10.3846/13923730.2014.897987
41. *Gruntų pagerinimo ir sustiprinimo rišikliais metodiniai nurodymai* [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2022-06-22]. Prieiga per: https://lakd.lt/wp-content/uploads/2021/08/MN_GPSR_12_turinys.pdf
42. *Automobilių kelių mineralinių medžiagų mišinių, naudojamų sluoksniams be rišiklių, techninių reikalavimų aprašas* [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2022-12-02]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/684c71c0236911ea8f0dfdc2b5879561?jfwid=ck9gyayon>
43. *Valstybinės reikšmės rajoninio kelio Nr. 3509 Viduklė–Gyliai–Šienlaukis ruožo nuo 7,41 iki 10,52 km kapitalinio remonto projektas* [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2022-05-15]. Prieiga per:

- <https://verslolink.lt/pirkimas/valstybines-reiksmes-rajoninio-kelio-nr-3509-vidukle-gyliai-sienlaukis-ruozo-nuo-741-iki-1052-km-kapitalinio-remonto-techninio-darb-431016/>
44. HE L., WANG Z. and W. GU. *Evolution of freeze–thaw properties of cement–lime solidified contaminated soil*. Environmental Technology and Innovation. [interaktyvus] 2021, 21 [žiūrėta 2022-03-18]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101189>
 45. *Geosintetikos naudojimo žemės darbams keliuose metodiniai nurodymai* [interaktyvus]. 2013 [žiūrėta 2022-06-22]. Prieiga per: https://lakd.lt/wp-content/uploads/2021/08/MN_GEOSINT_ZD_13_virselis_ir_turinys.pdf
 46. *Valstybinės reikšmės rajoninio kelio Nr. 4519 Gryblaukis – Batakliai ruožo kelio nuo 0,37 iki 1,393 km kapitalinio remonto projektas*. Vilnius, 2019. Lietuvos automobilių kelių direkcija prie Susisiekimo ministerija.
 47. ŠIUKŠČIUS A. Kelio konstrukcijos sutvirtinimo geotinklu vertinimas. *Daktaro disertacija* [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2022-12-02] Prieiga per: http://dspace.vgtu.lt/bitstream/1/3877/1/A_Siuksciaus%20disertacija.pdf
 48. *Geosintetika. Gairana* [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2022-12-02] Prieiga per: <https://gairana.lt/kategorijos/keliams-ir-tiltams/geosintetika/>
 49. *Natūralūs ir sintetiniai geogaminiai: Geosintetika* [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2022-12-02] Prieiga per: <https://fdocuments.net/document/natralis-ir-sintetiniai-geogaminiai-gruntai-turiantykinai-nedidel-stipr.html?page=1>
 50. PRIMUSZ P. et al. Bearing Capacity of Lime-Stabilized Soils. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2009, 12, 96-101 [žiūrėta 2020-12-02]. Prieiga per: ResearchGate.
 51. PETERFALVI J. et al. Evaluation of the Effect of Lime-Stabilized Subgrade on the Performance of an Experimental Road Pavement. *Construction and Building Materials* [interaktyvus] 2015, 36(2), 269-282 [žiūrėta 2022-12-15] Prieiga per: ResearchGate.
 52. TANZADEH R, VAFAEIAN, M. and M. YUSEFZADEH FARD. Effects of micro-nano-lime (CaCO₃) particles on the strength and resilience of road clay beds. *Construction and Building Materials* [interaktyvus] 2019, 217, 193-201 [žiūrėta 2022-11-18]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.048>
 53. CELAURO B. et al. Design Procedures for Soil-Lime Stabilization for Road and Railway Embankments. Part 1 - Review of Design Methods. *SIIV - 5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures* [interaktyvus] 2012 [žiūrėta 2022-10-25]. Prieiga per: Science Direct
 54. Stabilizavimas cementu. *KTD group (vaizdinė medžiaga)*. 2020 [žiūrėta 2022-12-02] Prieiga per: <https://www.keliutiesimas.lt/wp-content/uploads/2017/06/karmelavos-oro-uosto-kelio-irengimas-15.jpg>
 55. STR 1.01.03:2017. *Statinių klasifikavimas*. Vilnius: Lietuvos respublikos aplinkos ministerija.
 56. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST 1360-5:2019. *Automobilių kelių gruntai. Bandymo metodai. Statinio apkrovimo plokšte bandymas*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2019.
 57. DIN 18134 – Deutsche Norm. Determining the deformation and strength characteristics of soil by the plate loading test.
 58. VIRSIS, E., PAEGLITIS, A. and A. ZARINS. Evaluation Of The Residual Load-Bearing Capacity Of The Existing Road Using Plate Loading Test. *30th International Baltic Road*

- Conference* [interaktyvus] 2021, 1 - 8 [žiūrėta 2022-09-28]. Prieiga per: doi:10.1088/1757-899X/1202/1/012012
59. LEHMANN, S., LEPPLA, S. and A. NORKUS. Experimental study of the modulus of deformation determined by static and dynamic plate load tests. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* [interaktyvus] 2020, 15(4), 109-124 [žiūrėta 2022-09-18]. Prieiga per: doi: 10.7250/bjrbe.2020-15.497
60. NAGY, A. et al. Static and dynamic plate loading tests of stabilized soil samples used for riverbank consolidation. *International Conference CIBv 2020 Civil Engineering and Building Services* [interaktyvus]. 2021, 1-11 [žiūrėta 2022-10-18]. Prieiga per: doi: 10.1088/1757-899X/1138/1/012032
61. BILEVIČIENĖ, Tatjana ir Steponas JONUŠAUSKAS. *Statistinių metodų taikymas rinkos tyrimuose*. Vilnius: Mykolo Romerio Universitetas, 2011. ISBN 978-9955-19-242-8.
62. COCHRAN, William. *Sampling Techniques*. Harvard: New-York: John Wiley & Sons, 1977. ISBN 0-471-16240-X.
63. BAUERS W. K. M. et al. Multi-objective decision making for road design. *Transport* [interaktyvus] 2008, 23(3), 183-193 [žiūrėta 2022-03-18]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.3846/1648-4142.2008.23.183-193>
64. KAREL W., BAUERS W. K. M. and E. K. The MOORA method and its application to privatization in a transition economy. *Control and Cybernetics*. *Control and Cybernetics* [interaktyvus] 2006, 35, 445-469 [žiūrėta 2022-12-08]. Prieiga per: ResearchGate.
65. BALEŽENTIS T. ir A. BALEŽENTIS. Kaimo darnaus vystymo strateginis valdymas: daugiakriterinio vertinimo metodai ir integruotas Lietuvos ūkininkų ūkių veiklos efektyvumo vertinimas. *Management theory and studies for rural business and infrastructure development*. [interaktyvus] 2011, 1(25), 168-174 [žiūrėta 2022-02-08]. Prieiga per: <http://etalpykla.lituanistikadb.lt/fedora/objects/LT-LDB-0001:J.04~2011~1367176874830/datastreams/DS.002.0.01.ARTIC/content>
66. DAULAY, N., INTAN, B. and M. IRVAI. Comparison of the WASPAS and MOORA Methods in Providing Single Tuition Scholarships. *The IJICS (International Journal of Informatics and Computer Science)* [interaktyvus] 2021, 5(1), 84-94 [žiūrėta 2022-09-18]. Prieiga per: doi: 10.30865/ijics.v5i1.2969
67. FADLI, S. and K. IMTIHAN. Implementation of MOORA Method in Evaluating Work Performance of Honorary Teachers. *Journal Publications & Informatics Engineering Research* [interaktyvus] 2019, 4(1), 128-135 [žiūrėta 2022-09-18]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.33395/sinkron.v4i1.10192>
68. *Tauragės miesto pietinio aplinkkelio (1 etapo) nuo Vytauto g. iki Dariaus ir Girėno g. statybos projektas* [interaktyvus]. 2022 [žiūrėta 2022-05-15]. Prieiga per: <https://www.mercell.com/lt-lt/pirkimas/175012698/taurages-miesto-pietinio-aplinkkelio-naujosios-g-statybos-darbai-i-ir-ii-etapai-pirkimas.aspx>
69. *Rajoninio kelio Nr. 4512 Skaudvilė-Adakavas-Nemakščiai ruožo nuo 6,428 iki 12,180 km kapitalinio remonto darbai* [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2022-01-15]. Prieiga per: <https://pirkimai.eviesiejipirkimai.lt/ctm/Supplier/PublicPurchase/489006/0/0?returnUrl=&b=>
70. *Valstybinės reikšmės rajoninio kelio Nr. 1716 Plis-Raudonėnai ruožas nuo 2,9 iki 3,77 km* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2022-01-15]. Prieiga per: <http://adresai.vilnius21.lt/pilisraudonenai-j395.html>

71. *KPT SDK 19. Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės.* Vilnius: Lietuvos automobilių kelių direkcijos prie susisiekimo ministerijos, 2019.
72. Statybos rekomendacijos R 33-02. *Automobilių kelių inžineriniai geologiniai tyrinėjimai.* Vilnius: Lietuvos automobilių kelių direkcija prie susisiekimo ministerijos.