

Civil engineering
Statybos inžinerija

GRUNTO SANKASOS ŠLAITO STATUMO IR STABILUMO ANALIZĖ

Tadas TAMOŠIŪNAS **Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

Gauta 2021 m. gegužės 13 d.; priimta 2021 m. lapkričio 30 d.

Santrauka. Šiame straipsnyje aprašyti dažniausiai transporto keliuose pasitaikančių sankasų šlaitų stabilumo skaičiavimai ir jų rezultatai, taikant modifikuotą Bishop metodą. Skaičiavimais nustatyti mažiausi galimi skirtingų šlaitų statumo ir sankasos efektyvieji vidinės trinties kampai įvertinant skirtingus sankasos (pylimo) pagrindus, sankasos grunto tūrinius svorius, transporto sukeliamas apkrovas ir apkrovų pridėjimo vietas (pečius). Analizuojant gautus skaičiavimo rezultatus, nustatyta, kad siekiant užtikrinti šlaito stabilumą šlaitui esant 1:2 (26,57°) statumo, skaičiuotinis sankasos grunto efektyvusis vidinės trinties kampas turėtų būti $\varphi'_d \geq 28,5^\circ$, o šlaitui esant 1:1,75 (29,74°) statumo – $\varphi'_d \geq 29,8^\circ$. Kai šlaitas yra 2:3 (33,69°) statumo, šlaito stabilumo užtikrinti nepavyksta.

Reikšminiai žodžiai: šlaito stabilumas, šlaito statumas, grunto sankasa, automobilių keliai, transporto apkrovos, modifikuotas Bishop metodas, vidinės trinties kampas.

Įvadas

Grunto sankasų stabilumas yra vienas iš svarbiausių geležinkelių ir automobilių kelių rodiklių. Atliekant sankasų stabilumo skaičiavimus negalima vienodai traktuoti geležinkelių ir automobilių kelių sankasų stabilumo dėl skirtingų apkrovų dydžių ir apkrovų pridėjimo vietos. Nepaisant to, kad yra pakankamai daug atliktų tyrimų ir parengtų reglamentų bei taisyklių grunto sankasų stabilumui vertinti, kartais tenka susidurti su sankasų šlaitais, praradusiais stabilumą (Harabinova, 2017; Lu et al., 2020).

Lietuvoje yra pakankamai daug atliktų tyrimų su automobilių kelių grunto sankasomis. Pavyzdžiui, nustatytas didžiausias įšalo gylis, remiantis kelių oro sąlygų informacinės sistemos duomenimis, naudojamas kelių transportui (Laurinavičius & Juknevičiūtė-Žilinskienė, 2011), Lietuvos teritorija sudalinta į skirtingo šalčio poveikio zonas (Vaitkus et al., 2016), 2004 m. buvo parengtos automobilių kelių žemės sankasos įrengimo taisyklės, apimančios ir reikalavimus sankasų stabilumui (Statybos taisyklės ST188710638.06:2004). Taip pat Europos mastu Lietuvos teritorijai priskiriamas šlaitų statumo ir ilgio faktorius yra 0,35 (Panagos et al., 2015).

Šlaitų stabilumo faktorius gali būti vertinamas pagal ribinės pusiausvyros sąlygas (Hammah et al., 2005) bei naudojant skaitines baigtinių elementų programas, kurio-

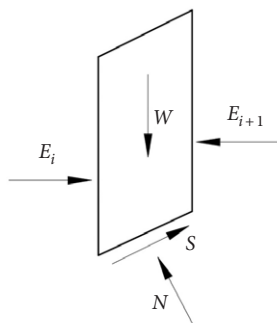
mis gaunami rezultatai koreliuoja su ribinės pusiausvyros metodu gautais rezultatais (Burman et al., 2015; Caicedo, 2019). Vienas iš seniausiai žinomų šlaitų stabilumo metodų yra Bishop metodas, kurį taikant gaunami rezultatai yra su pakankama atsarga (Matthews et al., 2014), lyginant rezultatus, gautus tikslesniais metodais, tokiais kaip Spencer ar Morgenstern-Price (Salunkhe et al., 2017).

Šiame straipsnyje yra nagrinėjami trys dažniausiai pasitaikantys transporto sankasų šlaitų statumai: 26,57° (1:2); 29,74° (1:1,75) ir 33,69° (2:3). Šio straipsnio tikslas – įvertinti sankasos šlaito stabilumą Bishop metodu keičiant grunto mechaninių savybių rodiklius ir pateikti gautų rezultatų interpretaciją. Pagal rezultatų analizę nustatyti mažiausią galimą skaičiuotinį šlaito efektyvųjį vidinės trinties kampą skirtingoms situacijoms (šlaitų statumui), kurios tenkintų šlaito laikomosios galios išnaudojimo sąlygas.

1. Bishop metodas

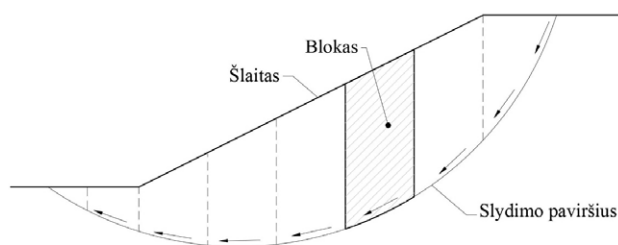
Modifikuotas Bishop metodas išrastas profesoriaus Bishop 1955 m. Londono imperatoriškajame koledže (Salunkhe et al., 2017). Taikant šį metodą, potenciali slystančio šlaito masė, esanti virš potencialaus slydimo paviršiaus (Liu & Hounsa, 2018), sudalinama į blokus (Duncan et al., 2014) (2 pav.). Laikoma, kad jėgos, veikiančios bloko

*Autorius susirašinėti. El. paštas tadas.tamosiunas@vilniustech.lt



1 paveikslas. Blokas su jį veikiančiomis jėgomis pagal modifikuotą Bishop metoda

Figure 1. A block with the forces acting on it according to a modified Bishop method



2 paveikslas. Į blokus sudalinta potenciali slystančio šlaito masė
Figure 2. The potential sliding mass of the slope divided into blocks

šonus, yra tik horizontalios, šlyties jėgų tarp blokų nėra (Aryal, 2006) (1 pav.). Jėgos sumuojamos vertikaliai, siekiant išpildyti pusiausvyros sąlygą šia kryptimi ir taip gauti normalinio įtempio išraišką ties kiekvieno bloko pagrindu. Pusiausvyros lygtis vertikalioms jėgoms pateikta toliau.

$$N \cos \alpha + S \sin \alpha - W = 0, \quad (1)$$

čia N – normalinė jėga, α – bloko pagrindo posvyrio kampas, S – šlyties jėga, W – bloko svoris.

Jėgos laikomos teigiamomis, kai jos veikia į viršų. Šlyties jėgos S sąsaja su kirpimo įtempiumi τ išreiškiama:

$$S = \tau \Delta l, \quad (2)$$

čia Δl – bloko pagrindo ilgis. Atsižvelgiant į šlyties stiprį s ir saugos faktorių:

$$S = \frac{s \Delta l}{FS}. \quad (3)$$

Šlyties stipris, išreikštas taikant efektyviųjų įtempčių teoriją ir Moro-Kulono stiprumo lygtį:

$$S = \frac{1}{FS} [c' \Delta l + (N - u \Delta l) \tan \varphi'], \quad (4)$$

čia c' – efektyvioji sankiba, u – porinis vandens slėgis, φ' – efektyvusis vidinės trinties kampas. Derinant anksčiau užrašytas lygtis, normalinė jėga gaunama:

$$N = \frac{W - (1/FS)(c' \Delta l - u \Delta l \tan \varphi') \sin \alpha}{\cos \alpha + (\sin \alpha \tan \varphi')/FS}. \quad (5)$$

Normalinis efektyvusis įtempis σ' ties bloko pagrindu gali būti išreiškiamas:

$$\sigma' = \frac{N}{\Delta l} - u. \quad (6)$$

Derinant pastarąsias dvi lygtis bei taikant jas sukimo momentų apie apskritimo centrą efektyviųjų įtempčių pusiausvyros lygtyje, gaunama saugos koeficiento FS lygtis:

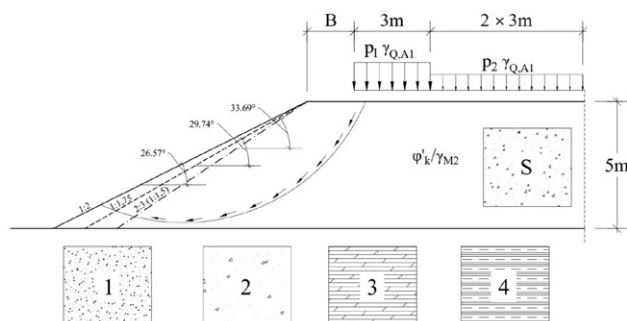
$$FS = \frac{\sum \left[\frac{c' \Delta l \cos \alpha + (W - u \Delta l \cos \alpha) \tan \varphi'}{\cos \alpha + (\sin \alpha \tan \varphi')/FS} \right]}{\sum W \sin \alpha} - u. \quad (7)$$

Keletas potencialių slydimo paviršių privalo būti patikrinti siekiant surasti pavojingiausią situaciją, kai saugos koeficientas FS yra mažiausias. Patikrinimas turi būti atliekamas ne tik keičiant slydimo paviršiaus spindulio dydį, bet ir keičiant slydimo paviršiaus centro poziciją.

2. Skaičiuotinė situacija

Dirbtinės transporto kelių sankasos (pylimai) dažniausiai sudarytos iš rupios frakcijos gruntų – smėlio ir žvyro mišinių, todėl pagrindinis mechaninis šlaito stabilumo parametras, vadovaujantis analitiniu modifikuotu Bishop metodu, yra efektyvusis vidinės trinties kampas φ' . Taip pat sankasos šlaito stabilumas priklausys nuo šlaito statumo, sankasos grunto tūrinio svorio γ , sankasos (pylimo) pagrindo, transporto sukeliama apkrovų p_i ir apkrovų pridėjimo peties B . Straipsnyje nagrinėjama skaičiuojamoji schema pavaizduota 3 paveiksle.

Skaičiavimams parinkti trys dažniausiai pasitaikantys transporto sankasų šlaitų statumai: $26,57^\circ$ (1:2); $29,74^\circ$ (1:1,75); $33,69^\circ$ (2:3). Sankasos aukštis visuose skaičiavimuose išlaikytas pastovus – 5,0 m. Sankasos pagrindui parinkti keturi skirtingi gruntai: tankus smėlis; purus smėlis; pusketis molis; didelio plastiškumo molis. Skaičiavimuose naudoti visų keturių pagrindų ir sankasos grunto geotechniniai parametrai pateikti 1 lentelėje. Šlaito nestabilumas (stabilumo praradimas) apibrėžiamas kaip statinio pusiausvyros netekimas, todėl pagal LST EN 1997-1 privaloma tikrinti, ar nebus viršytas ribinis saugos būvis. Šiam tikrinimui naudota pirmojo projektavimo atvejo antroji



3 paveikslas. Nagrinėjamos situacijos skaičiuotinė schema
Figure 3. Computational scheme of the situation under consideration

1 lentelė. Skaičiavimuose naudotų grunto parametrų reikšmės
Table 1. Values of soil parameters used in the calculations

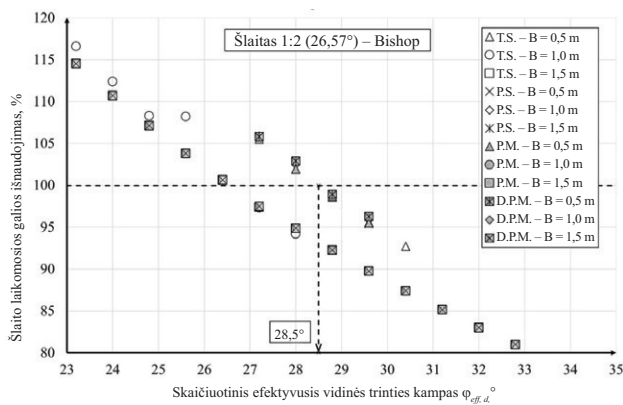
Žymuo	Sankasos ir pagrindų gruntų pavadinimai	γ , kN/m ³	ϕ'_k , °	$\phi'_{d, DA1/C2}$, °	c'_k , kPa	$c'_{d, DA1/C2}$, kPa
1	Tankus smėlis	19,0	40,0	33,9	–	–
2	Purus smėlis	18,0	30,0	24,8	–	–
3	Puskietis molis	21,0	19,0	15,4	17,0	13,6
4	Didelio plastiškumo molis	21,0	15,0	12,1	15,0	12,0
S	Rupus gruntas (smėlis arba žvyras)	19,0	29,0–41,0	23,9–34,8	–	–

kombinacija, pagal kurią grunto charakteristinėms mechaninėms savybėms – vidinės trinties kampui ϕ'_k (kampo tangentui) ir sankibai c'_k – mažinti naudojamas dalinis koeficientas $\gamma_{M2} = 1,25$. Dalinis koeficientas kintamoms transporto sukeliams apkrovoms $\gamma_Q = 1,3$.

Transporto apkrovos pasirinktos pagal LST EN 1991-2 pirmąjį apkrovų modelį, kuris 2017 m. pakoreguotas geotechniniams statiniams pagal Suomijos transporto agentūros pateiktas rekomendacijas NCCI 7 (Liikenneviraston ohjeita, 2017). Transporto apkrovų charakteristinės reikšmės lygios: $p_1 = 40,0$ kPa; $p_2 = 9,0$ kPa. Skaičiavimuose pasirinktos apkrovų pridėjimo peties B reikšmės: 0,5 m; 1,0 m; 1,5 m.

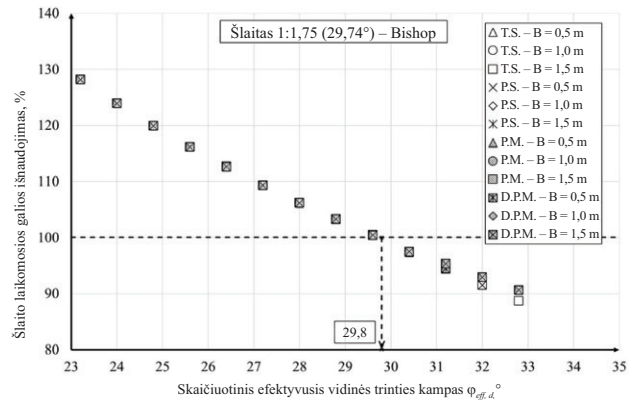
3. Rezultatai

Atlikus sankasos šlaito stabilumo skaičiavimus, esant trimis skirtingiems šlaito statumams (1:2 – 26,57°; 1:1,75 – 29,74°; 2:3 – 33,69°), kintančiam sankasos efektyviojo skaičiuotinio vidinės trinties kampui $\phi'_{d,}$ skirtingiems sankasos pagrindams ir kintančiam transporto sukeliamų apkrovų pridėjimo pečiu B , buvo nustatyti kritiniai skai-

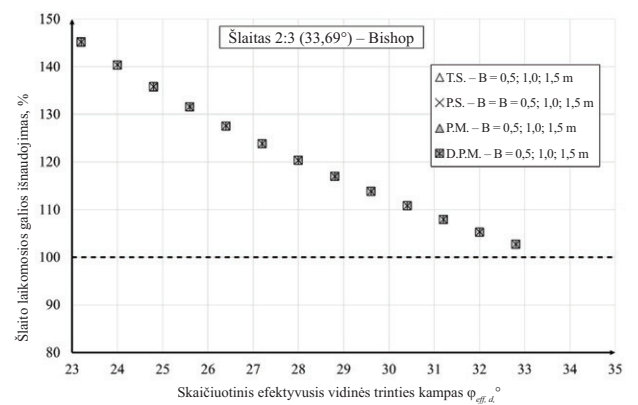


4 paveikslas. Šlaito laikomosios galios išnaudojimo priklausomybė nuo skaičiuotinio efektyviojo vidinės trinties kampo ir sankasos pagrindo, kai šlaito statumas 1:2 (26,57°): T.S. – pagrindas yra tankus smėlis; P.S. – pagrindas yra purus smėlis; P.M. – pagrindas yra puskietais molis; D.P.M. – pagrindas yra didelio plastiškumo molis

Figure 4. Dependence of slope bearing capacity utilization on the calculated effective internal friction angle and embankment base at a slope steepness of 1:2 (26.57°): T.S. – the base is dense sand; P.S. – the base is loose sand; P.M. – the base is semi-hard clay; D.P.M. – the base is a clay of high plasticity



5 paveikslas. Šlaito laikomosios galios išnaudojimo priklausomybė nuo skaičiuotinio efektyviojo vidinės trinties kampo ir sankasos pagrindo, kai šlaito statumas 1:1,75 (29,74°): T.S. – pagrindas yra tankus smėlis; P.S. – pagrindas yra purus smėlis; P.M. – pagrindas yra puskietais molis; D.P.M. – pagrindas yra didelio plastiškumo molis
Figure 5. Dependence of slope bearing capacity utilization on the calculated effective internal friction angle and embankment base at a slope steepness of 1:1.75 (29.74°): T.S. – the base is dense sand; P.S. – the base is loose sand; P.M. – the base is semi-hard clay; D.P.M. – the base is a clay of high plasticity



6 paveikslas. Šlaito laikomosios galios išnaudojimo priklausomybė nuo skaičiuotinio efektyviojo vidinės trinties kampo ir sankasos pagrindo, kai šlaito statumas 2:3 (33,69°): T.S. – pagrindas yra tankus smėlis; P.S. – pagrindas yra purus smėlis; P.M. – pagrindas yra puskietais molis; D.P.M. – pagrindas yra didelio plastiškumo molis
Figure 6. Dependence of slope bearing capacity utilization on the calculated effective internal friction angle and embankment base at a slope steepness of 2:3 (33.69°): T.S. – the base is dense sand; P.S. – the base is loose sand; P.M. – the base is semi-hard clay; D.P.M. – the base is a clay of high plasticity

čiuotiniai efektyvieji vidinės trinties kampai $\varphi'_{d,crit}$ kurie nurodo mažiausiąją šio parametro reikšmę, reikalingą nagrinėjamos skaičiuotinės situacijos sankasos stabilumui užtikrinti.

Skaičiavimus atlikus su 1:2 (26,57°) statumo sankasos šlaitu, nustatytas kritinis skaičiuotinis efektyvusis vidinės trinties kampas – $\varphi'_{d,crit} = 28,5^\circ$ (4 pav.). Kai šlaito statumas 1:1,75 (29,74°), nustatytas skaičiuotinis efektyvusis vidinės trinties kampas – $\varphi'_{d,crit} = 29,8^\circ$ (5 pav.). Šlaito statumui esant 2:3 (33,69°), tikrinant pasirinktuose sankasos efektyviojo vidinės trinties kampo režiuose, kritinė reikšmė buvo nepasiekta (6 pav.), šlaitas visais atvejais buvo nestabilus.

Išvados

Įvertinus literatūroje pateikiamus duomenis ir pasirinktas skaičiuotinių situacijų prielaidas bei nustatčius sankasos šlaito kritinius skaičiuotinius efektyviusis vidinės trinties kampus $\varphi'_{d,crit}$ galima daryti šias išvadas:

- Sankasos šlaitui esant 1:2 (26,57°) statumo, siekiant užtikrinti šlaito stabilumą, skaičiuotinis sankasos rupaus grunto efektyvusis vidinės trinties kampas turėtų būti $\varphi'_d \geq 28,5^\circ$. Charakteristinė šio kampo reikšmė – $\varphi'_k \geq 34,2^\circ$.
- Sankasos šlaitui esant 1:1,75 (29,74°) statumo, siekiant užtikrinti šlaito stabilumą, skaičiuotinis sankasos rupaus grunto efektyvusis vidinės trinties kampas turėtų būti $\varphi'_d \geq 29,8^\circ$. Charakteristinė šio kampo reikšmė – $\varphi'_k \geq 35,6^\circ$.
- Sankasos šlaitui esant 2:3 (33,69°) statumo, nepavyko užtikrinti sankasos šlaito stabilumo net ir padidinus efektyvųjų skaičiuotinių vidinės trinties kampą iki $\varphi'_d = 34,8^\circ$ (charakteristinė šio kampo reikšmė $\varphi'_k = 41,0^\circ$). Tokio statumo šlaitas yra per status. Norint eksploatuoti tokio statumo šlaitą transporto keliuose, reikalingas papildomas mechaninis ar / ir cheminis sankasos grunto stabilizavimas.
- Modifikuotas Bishop metodas vis dar išlieka aktualus ir taikytinas skaičiuojant sankasų šlaitų stabilumą. Metodo paprastas pritaikomumas ir gaunamų rezultatų tikslumas, lyginant su kitais analitiniais ir skaitiniais metodais, daro jį patrauklų inžinieriams, sprendžiant tipines rupaus grunto šlaitų stabilumo problemas.
- Gauti rezultatai yra taikomi tik sankasos stabilumo skaičiavimo atžvilgiu. Kadangi sankasų šlaitai yra įrengiami iš rupių gruntų, kiekvienu atskiru atveju turi būti vertinamas priešerozinių priemonių panaudojimo tikslingumas siekiant išvengti grunto erozijos ir sufozijos procesų.

Padėka

Autorius dėkoja dr. Šarūniui Skuodžiui už vertingas pastabas ir pagalbą rašant straipsnį.

Interesų deklaracija

Autoriai neturėjo finansinių, profesinių ar asmeninių interesų su kitomis suinteresuotomis organizacijomis ar asmenimis.

Literatūra

- Aryal, K. P. (2006). *Slope stability evaluations by limit equilibrium and finite element methods* [Doctoral dissertation]. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway. <http://hdl.handle.net/11250/231364>
- Burman, A., Acharya, S. P., Sahay, R. R., & Maity, D. (2015). A comparative study of slope stability analysis using traditional limit equilibrium method and finite element method. *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, 16(4), 467–492.
- Caicedo, B. (2019). *Geotechnics of roads: Fundamentals*. Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9780429025914>
- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons.
- Hammah, R., Yacoub, T., Corkum, B., & Curran, J. (2005). A comparison of finite element slope stability analysis with conventional limit-equilibrium investigation. In *Proceedings of the 58th Canadian Geotechnical and 6th Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conferences – GeoSask 2005* (pp. 1–8). <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/papers/A-Comparison-of-Finite-Element-Slope-Stability-Analysis-with-Conventional-Limit-Equilibrium-Investigation.pdf>
- Harabinova, S. (2017). Assessment of slope stability on the road. *Procedia Engineering*, 190, 390–397. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.354>
- Laurinavičius, A., & Juknevičiūtė-Zilinskienė, L. (2011, May 19–20). Eleven years of RWIS operation in Lithuania: Possibilities for the use of the data collected. In *The 8th International Conference “Environmental Engineering”* (pp. 1108–1112), Vilnius, Lithuania.
- Lietuvos automobilių kelių direkcija. (2004). *Statybos taisyklės ST188710638.06:2004. Automobilių kelių žemės sankasos įrengimas* (3 priedas. Automobilių kelių žemės sankasos stabilumas). Vilnius.
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2003). *Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 2 dalis. Tiltų eismo apkrovos* (LST EN 1991-2). Vilnius.
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2005). *Eurokodas 7. Geotechninis projektavimas. 1 dalis. Pagrindinės taisyklės* (LST EN 1997-1). Vilnius.
- Liikenneviraston ohjeita. (2017). *Eurokoodin soveltamisohje – Geotekninen suunnittelu (NCCI 7). Siltojen ja pohjarakenteiden suunnitteluohjeet*. https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2017-13_ncci7_web.pdf
- Liu, C. Y., & Hounsa, U. S. F. (2018). Analysis of road embankment slope stability. *Open Journal of Civil Engineering*, 8, 121–128. <https://doi.org/10.4236/ojce.2018.82010>
- Lu, M., Zhang, J., Zhang, L., & Zhang, L. (2020). Assessing the annual risk of vehicles being hit by a rainfall-induced landslide: A case study on Kennedy Road in Wan Chai, Hong Kong. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(6), 1833–1846. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1833-2020>
- Matthews, C., Farook, Z., & Helm, P. (2014). Slope stability analysis – limit equilibrium or the finite element method?

Ground Engineering, 48(5), 22–28. <http://www.geplus.co.uk/technical-paper-database-/technical-paper-slope-stability-analysis-limit-equilibrium-or-the-finite-element-method/8667183.article>

Panagos, P., Borrelli, P., & Meusburger, K. (2015). A new European slope Length and Steepness Factor (LS-Factor) for modeling soil erosion by water. *Geosciences*, 5(2), 117–126. <https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>

Salunkhe, D. P., Bartakke, R. N., Chvan, G., & Kothavale, P. R. (2017). An overview on methods for slope stability analysis. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 6(03), 2278–0181. <https://doi.org/10.17577/IJERTV6IS030496>

Vaitkus, A., Gražulytė, J., Skrodenis, E., & Kravcovas, I. (2016). Design of frost resistant pavement structure based on Road Weather Stations (RWSs) data. *Sustainability*, 8(12), 1–13. <https://doi.org/10.3390/su8121328>

ANALYSIS OF EMBANKMENT SLOPE STEEPNESS AND STABILITY

T. Tamošiūnas

Abstract

This paper describes the stability calculations of the most common road embankments slopes and their results using the modified Bishop method. By searching for the smallest possible effective angle of internal friction of the different slope steepness embankments, the possible different bases of the embankment, the weight of the embankment soil, the load caused by transport and the location of load application (shoulder) were evaluated. Analyzing the obtained calculation results, it was determined that at a slope of 1:2 (26.57°) steepness, to ensure slope stability, the calculated effective internal friction angle of the embankment soil should be $\varphi'_d \geq 28.5^\circ$, and at a slope of 1:1.75 (29.74°) steepness – $\varphi'_d \geq 29.8^\circ$. When the slope is 2:3 (33.69°) steepness, the stability of the slope cannot be guaranteed.

Keywords: slope stability, slope steepness, soil embankment, roads, transport loads, modified Bishop method, angle of internal friction.