

UDK: 624: 551.588.7

doi:10.5379/urbani-izziv-2024-35-01-02

Prejeto: 24. 5. 2023

Sprejeto: 19. 3. 2024

Tamara BRAČKO
Primož JELUŠIČ
Bojan ŽLENDER

Koncept prilagajanja geokonstrukcij z upoštevanjem vplivov podnebnih sprememb

Članek predstavlja problematiko potencialno nestabilnih pobočnih območij v kontekstu podnebnih sprememb. Predstavljen je možni pristop urejanja in upravljanja pobočij, ki upošteva različne rešitve, predvsem temelječe na naravi. Uporabljena je metodologija načrtovanja, ki upošteva vplive podnebnih sprememb na geomehanske lastnosti tal in posledično odziv tal in konstrukcij. Priказani so tudi učinki izbranih ukrepov na prilagajanje podnebnim spremembam. Predlagan je koncept prilagajanja potencialno nestabilnih geokonstrukcij, glede na pričakovane podnebne spremembe za geomehanske analize in geotehničnega načrtovanja, ki upošteva vzročno

verigo s t. i. signali podnebnih sprememb, učinki, vplivi (posledice) in ukrepi. Implementacija koncepta je prikazana na tipičnem primeru analize stabilnosti pobočja. Sklep analize je, da so za stabilnost pobočja pogosto ključni dejavniki, kot so neto infiltracija vode v pobočje, vodoprepustnost zemljine in pretok podzemne vode v pobočju. Te dejavnike lahko reguliramo tudi z na naravi temelječimi rešitvami.

Ključne besede: prilagajanje podnebnim spremembam, na naravi temelječe rešitve, stabilnost pobočij, infiltracija padavin, neto infiltracija vode

1 Uvod

Iz izkušenj s plazovi vemo, da so najbolj kritične pobočne površine v suburbanih območjih, plazovi se praviloma pojavljajo na mestih, ki so redko pozidana s stavbami in v območju lokalnih cest. V Sloveniji je zato uveljavljena praksa, da se za takšna območja v fazi načrtovanja objektov in pridobivanja gradbenega dovoljenja izvede raziskava, ki obravnava verjetnost pojava plazov, in se projektna dokumentacija dopolni z ustreznim geološko-geotehničnim poročilom, ki je temelj za geomehansko analizo in načrtovanje.

Pri geomehanskih analizah z upoštevanjem podnebnih sprememb se zaradi tega pojavljajo razne težave, ki s predpisi in standardi še niso dovolj rešene:

- Opis podnebnih značilnosti z ovrednotenjem podnebnih sprememb je težko izvedljiv, v raziskavi so zato podnebne značilnosti in pričakovane spremembe podnebja v prihodnosti opisane s t. i. signali podnebnih sprememb, ki se določijo iz klimatoloških napovedi (podnebnih podatkov in modelov napovedi podnebnih sprememb). Težava je, da ti signali niso natančno določljivi, njihove vrednosti imajo veliko odstopanje, glede na izbrani scenarij podnebnih sprememb in tudi sicer niso neposredno uporabni kot vhodni podatek v geomehanski analizi.
- Učinki podnebnih sprememb povzročajo spremenjene geološke značilnosti nekega območja in spremenjene geomehanske parametre tal. Ti učinki so težko natančno določljivi (geološki modeli, geomehanski preizkusi in modeli), tudi če bi bili signali natančno določeni.
- Podnebni signali in učinki so medsebojno soodvisni. Vsak posamezni signal povzroči enega ali več učinkov, vendar ne vseh hkrati.
- Signali in učinki povzročijo odziv, tj. odzive (posledice) na tla in konstrukcijo, ki so težko določljivi zaradi hkratnih signalov, učinkov in drugih (nepodnebnih) vplivov, ki so standardno upoštevani v analizi.
- Obstaja veliko geokonstrukcij, vsak tip pa zahteva specifično geomehansko analizo in ustrezne geotehnične ukrepe. Za analize posameznih tipov geokonstrukcij so znani standardni pristopi, ki pa ne podajajo napotkov glede podnebnih sprememb.
- Opredelitev vzročne povezave signali–učinki–odzivi je zahtevna, povezava je pri vsaki geokonstrukciji drugačna.
- Obstaja širok nabor možnih geotehničnih ukrepov, treba pa je ugotoviti, kako ukrepi vplivajo na signale in učinke podnebnih sprememb in na varnost geokonstrukcije.

Predstavljen je koncept prilagajanja potencialno nestabilnih geokonstrukcij, z upoštevanjem vplivov podnebnih sprememb, ki je splošen in ga je mogoče uporabiti za vse tipične geokon-

strukcije. Med geokonstrukcije prištevamo tudi brežine in pobočja. V ta namen je razvita vzročna veriga: signali podnebnih sprememb–učinki–odzivi (posledice)–ukrepi. Implementacija koncepta je predstavljena na primeru pobočja pod cesto, s katere se prosto razliva meteorna voda. Predlagan je možen pristop urejanja in upravljanja, ki temelji na rešitvah, temelječih na naravi. To so rešitve, ki jih navdihuje in podpira narava. So stroškovno učinkovite, hkrati zagotavljajo okoljske, družbene in gospodarske koristi. Omogočajo, da bolj raznovrstna narava, naravne lastnosti in procesi preidejo v mesta, krajine in morske krajine z lokalno prilagojenimi, učinkovitimi in sistemskimi posegi (Evropska komisija, 2023).

Predstavljena tema je del raziskovalnega projekta, ki ga izvaja delovna skupina Climate Change Adaptation (ELGIP, 2022), v okviru evropske platforme geotehničnih inštitutov ELGIP - European Large Geotechnical Institute Platform (ELGIP, Geotechnical Research in Europe, 2022). Raziskava omenjene delovne skupine je omejena na območje Evrope. Raziskava, predstavljena v tem članku, je bila razdeljena v tri glavne faze. V prvi fazi je bil izveden pregled literature. V drugi fazi je bila analizirana vzročna povezava med signali in učinki podnebnih sprememb ter možnimi vplivi signalov in učinkov podnebnih sprememb na pobočja in konstrukcije (podnebna geomehanska zasnova signali–učinki–odzivi–ukrepi). V tretji fazi je bil podan koncept za geomehansko analizo in načrtovanje z upoštevanjem vplivov podnebnih sprememb. Na podlagi tega koncepta smo v članku poskusili upoštevati vse težave, ki nastopijo pri analizah zdajšnjih in novih geokonstrukcij, in to ob upoštevanju podnebnih sprememb, ter jih implementirati in prikazati na realnem primeru plazov.

1.1 Pregled literature

Mednarodne organizacije za podnebne spremembe so objavile številne publikacije in dokumente, ki se nanašajo na podnebne spremembe. Mnogi avtorji razpravljajo o vplivih podnebnih sprememb na okolje. V tem prispevku se omejujemo le na geotehnični vidik prilagajanja podnebnim spremembam. Vardon (2015) je leta 2014 proučil vplive podnebnih sprememb, ki bodo najverjetneje učinkovali na okolje. Opisal je naslednje značilnosti podnebnih sprememb: temperatura, padavine, veter, vihanje morske gladine, neurja, rečni tok, mraz, ki bodo imele vpliv na geokonstrukcije. Davies (2011) navaja, da je kvantifikacija neto infiltracije vode v tla odvisna od podatkov o podnebj, od tal in rastlinja.

Podnebne parametre (padavine, relativna vlažnost, temperatura, hitrost vetra in sončno sevanje) je mogoče meriti na vremenskih postajah, lastnosti tal in vegetacije pa lahko ugotovljamo v laboratoriju ali na terenu (Vardon, 2015). Površinski odtok vode nastane, če količina padavin preseže zmogljivost

infiltracije tal. Računski postopki za določitev vsake vodne bilance so kompleksni in vsebujejo številne predpostavke (Davies, 2011). Za proučevanje stabilnosti in značilnosti pronicanja vode na pobočju v padavinskih razmerah se lahko uporabljajo laboratorijski testi modelov (Chen idr., 2019) in analiza programske opreme končnih elementov (Yan in Jiao, 2018). V geomehansko analizo je treba vključiti vpliv številnih dejavnikov na tla, kot so strižni kot zemljine, vsebnost vode, hidravlična prepustnost, trajanje in intenzivnost padavin (Cho, 2017; Chen idr., 2019; Dyson idr., 2019; Oggero idr., 2021).

Prvo analizo nevarnosti zemeljskega plazju v povezavi s podnebjem je zagotovil projekt SafeLand (2012). Uporabil je kontinuum infiltracije tal, vključno z evapotranspiracijo za analizo stabilnosti. Vahedifard idr. (2018) so se osredotočili na geokonstrukcije pod delno nasičenimi pogoji, pri čemer je sprememba lastnosti tal opredeljena kot vzrok vpliva podnebnih sprememb. Pk (2017) je analiziral stabilnost nasipov za sedanje in prihodnje podnebje z uporabo numeričnega modeliranja in pokazal, da so učinki podnebnih sprememb močno odvisni od hidravlične lastnosti nasipnih materialov. Procesi infiltracije in izhlapevanja vode na površini tal so na splošno odvisni glede na prevladujoče podnebne razmere in vsebnost vode v tleh. Skupna količina vode, ki se infiltrira v tla, pomembno vpliva na porni tlak in stabilnost pobočij. Med padavinami deževnica pronica v pobočje in postopoma tvori prehodno nasičeno območje. Sukcija se postopoma zmanjšuje, kar zmanjša strižno trdnost tal na pobočju in se poveča tveganje za nestabilnost pobočja (Andreea, 2016; Wang idr., 2018; Zhou idr., 2019). Park idr. (2019) so analizirali nasipe in stabilnost brežin, z upoštevanjem statističnih podatkov vzorcev padavin in hidromehanskih lastnosti tal. Insana idr. (2021) so raziskali, kako se problemi z geokonstrukcijami pod vplivom podnebnih sprememb obravnavajo v nacionalnih načrtih za prilagajanje. Ugotovili so, da posebne določbe za prilagajanje geokonstrukcij na podnebne spremembe na splošno primanjkujejo in so podane predvsem v obliki strategij za specifične probleme.

Za Slovenijo so po napovedih podnebnih sprememb Agencije Republike Slovenije za okolje v poročilu Podnebne spremembe 2021 (2021) napovedane spremembe temperature zraka in padavin, pri čemer bo to, kako velike bodo te spremembe, odvisno od količine toplogrednih plinov. V primeru različnih podnebnih scenarijev naj bi ta temperatura zraka v primerjavi z obdobjem 1981–2012 narasla za od 1,3 °C do 4,1 °C. Bertalanč idr. (2018) napovedujejo, da lahko do sredine stoletja pričakujemo veliko ekstremnih vremenskih dogodkov: hudo vročino poleti, povečano spremenljivost temperature in padavin poleti, več močnih padavinskih dogodkov, okrepitev hidrološkega cikla, pogostejše zdajšnje stoletne poplave, precejšnje povečanje pogostosti poletne suše, verjetno povečanje števila dni z ugodnimi razmerami za nastanek poletnih neurij.

Prilagajanje mest na ekstremne dogodke ali njihova krepitev odpornosti proti tem dogodkom je kompleksen proces, za katerega sta potrebna vključitev in sodelovanje vseh deležnikov, ki (so)oblikujejo in upravljajo mestni prostor (Klemen, 2020). Radinja idr. (2021) opozarjajo na problematiko upravljanja voda v mestih, ki je lahko uspešna le v interdisciplinarnem povezovanju pristojnih iz vseh strok (vodarji, prostorski načrtovalci, urbanisti, arhitekti in krajinski arhitekti, gradbeniki, geografi, sociologi idr.). Predlagajo ukrepe s t. i. modro in zeleno infrastrukturo. Modro-zelena infrastruktura so naravni in polnaravni decentralizirani sistemi, ki so namenjeni upravljanju padavinskih voda v mestih in hkrati opravljajo zelo raznovrstne ekosistemske storitve. Razen v nekaj tujih mestih, kjer so že sprejeli strategije za njihovo sistematično uvedbo, je uvajanje modro-zelene infrastrukture omejeno na zgolj posamezne osamljene primere. Krajnc (2019) ugotavlja, da učinki podnebnih sprememb in zdajšnje stanje v urbanih naseljih oblikujejo razmere, ki jim mestna infrastruktura v kritičnih trenutkih (npr. ekstremne padavine, vročinski valovi) vedno pogostejše ni več kos. Kristl idr. (2020) obravnavajo poglobitve izzive v zvezi z odpornostjo proti podnebnim spremembam z vidika stavbnega sektorja, kot so sheme prilagajanja podnebnim spremembam, energijska učinkovitost in ukrepi za blaženje teh sprememb. Iz zivi so ovrednoteni glede na najnovejše stanje razvoja področja, raziskovalni interes in regulativna vprašanja, pri čemer se pri pregledu znanstvene literature presoja napredek in se opredeljujejo raziskovalne vrzeli. Pregled literature nakazuje, da se odpornost proti podnebnim spremembam večinoma nanaša na večje sisteme, na ravni stavb pa se to področje šele razvija.

Raymond idr. (2017) in Cohen-Shacham idr. (2016) predstavljajo rešitve, s katerimi je mogoče obravnavati številne družbene izzive hkrati. Te temeljijo na naravi in vključujejo krepitev človekove blaginje, urbano regeneracijo, izboljšanje obalne odpornosti, večnamensko upravljanje povodij in obnovo ekosistemov, povečanje trajnostne rabe snovi in energije, razvoj zavarovalne vrednosti ekosistemov in povečano sekvenciacijo ogljika. Seznam možnih ukrepov, ki so dobro znani v geotehničnem inženirstvu, je bil predstavljen v podatkovni bazi LaRimiT (Uzielli idr., 2017; Capobianco idr., 2022). Podatkovna baza LaRimiT, ki je sprva vključevala le običajne rešitve, ki temeljijo na tradicionalnih metodah, je bila razširjena na rešitve, temelječe na naravi, za obvladovanje erozije in ublažitev plitvih plazov z rastlinami in uporabo naravnih materialov. Rešitve, temelječe na naravi, in konvencionalne rešitve je mogoče združiti tudi v hibridne rešitve.

2 Zgradba raziskave in metode dela

Podnebne značilnosti, kot so veter, vlažnost, oblačnost, megla, atmosferski tlak itd., in njihove spremembe pomembno vpliva-

jo na tla in na objekte (nasipi, temelji, podporne konstrukcije itd.). Vendar opis značilnosti podnebnih sprememb ne omogoča izvedbe geotehnične analize, zato jih je treba izraziti v uporabnejši obliki. Vse signale, učinke in vplive podnebnih sprememb je skupaj predlagala in predstavila delovna skupina ELGIP Climate Change Adaptation, ki je začela delovati aprila 2018. Ta delovna skupina je predstavila opis značilnosti podnebnih sprememb s signali in učinki podnebnih sprememb in jih predstavila v članku (Insana idr., 2021).

Značilnosti podnebnih sprememb zagotavljajo opis podnebnih sprememb, ki pa je preveč splošen za reševanje geotehničnih problemov. Najpomembnejši signali podnebnih sprememb za tla so povečane padavine, zmanjšana količina padavin/podaljšana sušna obdobja, povišana temperatura zraka in obdobja toplega vremena pozimi, povečano število ciklov močnega dežja in suše, povečano število ciklov zmrzali in odmrznitve, povečana pogostost in intenzivnost ciklonov in neviht, zvišanje morske gladine in povečana hitrost vetra (Insana idr., 2021).

Signali podnebnih sprememb imajo različne učinke na tla, kamninsko podlago, podtalnico, površinske vode in rastlinstvo ter vplivajo na spreminjanje tal in objektov. Te vplive, v tem prispevku imenovane učinki podnebnih sprememb, ugotavljajo geološki in geotehnični strokovnjaki na podlagi klimatoloških podatkov. Najbolj značilni učinki podnebnih sprememb z geotehničnega vidika so poslabšanje nosilnosti tal, povečano preperevanje, povečana vodna erozija, povečan površinski odtok vode, zvišan nivo in povečan pretok površinske in podzemne vode, znižan nivo in zmanjšan pretok površinske in podzemne vode, povečana vetrna erozija, spremenjene geotehnične lastnosti zmrznjenih zemljin, povečan površinski odtok zaradi taljenja snega, spremenjene lastnosti glinenih tal pri krčenju in nabrekanju, povečana vodna in vetrna erozija, pogosto in višje zvišanje morske gladine zaradi nevihtnih valov, povečana obremenitev zaradi močnega vetra in valov, obalna erozija, povečana dinamična obremenitev (Insana idr., 2021).

2.1 Odzivi pobočij na podnebne spremembe

Signali in učinki podnebnih sprememb povzročijo odziv pobočja in druge posledice, ki se v primeru pobočij kažejo kot nestabilnost in v skrajnem primeru tudi porušitev pobočja. V skladu z evropskim standardom EN 1997: Geotehnično načrtovanje (Evrokod 7: Geotehnično Projektiranje - 1. Del: Splošna pravila, 2005) se odziv izračuna kot posledica povečane obremenitve in spremembe (poslabšanja) lastnosti materiala, ki tvori pobočje (SIST EN 1997-1, 2005). Pojavne oblike nestabilnosti pobočja so različne (preglednica 1) in odvisne od geometrije in slojevitosti pobočja, materiala nestabilne mase ter podnebnih signalov in učinkov.

Preglednica 1: Oblike nestabilnosti pobočij (vir: prilagojeno po Varnes, 1978)

Tip nestabilnosti	Rotacijski/translacijski plaz
	Padanje
	Prevrnitev
	Bočni razmik
	Tok
Material	Zemljina
	Drobir
	Kamnina
Globina	Površinsko ($\leq 0,5$ m)
	Plitvo ($0,5$ m– 3 m)
	Srednje globoko (3 m– 8 m)
	Globoko (8 m– 15 m)
	Zelo globoko (≥ 15 m)
Hitrost	Skrajno hitro (≥ 3 m/s)
	Zelo hitro (~ 30 cm/min)
	Hitro (~ 1 m/dan)
	Srednje (~ 1 m/mesec)
	Počasi (~ 1 m/leto)
	Zelo počasi (≤ 30 cm/leto)

2.2 Ukrepi

Podnebne spremembe lahko predstavimo z uporabo raznih scenarijev značilnih potekov vsebnosti toplogrednih plinov (Representative Concentration Pathways, RCP). Obstajajo štirje poteki vsebnosti toplogrednih plinov, vsak vključuje razpon osnovnih vrednosti in ocenjenih emisij do leta 2100: scenarij blaženja RCP2.6, dva vmesna scenarija RCP4.5 in RCP6.0 ter scenarij z visokimi emisijami RCP8.5 (Medvladni panel za podnebne spremembe, 2022). Učinke podnebnih sprememb je smiselno upoštevati tako pri načrtovanju novih objektov kot pri analizi zdajšnjega stanja. Preglednica 2 prikazuje splošne napotke za oba primera. Kadar načrtujemo nov objekt, zmeraj najprej naredimo analizo, v kateri upoštevamo podnebne spremembe za v prihodnje in na podlagi tega sledi načrtovanje. Če pa proučujemo zdajšnjo geokonstrukcijo, je ukrep odvisen od predpostavljenih posledic podnebnih sprememb. Če analiza pokaže, da se bodo poslabšale lastnosti tal, da bo posledično nižji faktor varnosti in kriteriji za varnost objekta na pobočju niso zadovoljeni, je treba opraviti korake, kot so predvideni za novi objekt. Kadar se poškodba na objektu ali porušitev že zgodi, se izvedejo interventni ukrepi.

Preglednica 2: Koraki načrtovanja, kriteriji in ukrepi za nove in zdajšnje geokonstrukcije (vir: prilagojeno po Bračko, T., idr., 2022)

Objekt	Projektni koraki	Kriteriji (podnebno prilagajanje)	Ukrepi
Nova geokonstrukcija	Študija izvedljivosti	Merila za varnost in uporabnost so, ob upoštevanju podnebnih sprememb, upoštevana.	Novo načrtovanje
	Idejna zasnova		
	Podrobna zasnova		
	Izvedba		
Obtoječa geokonstrukcija	Preveritev ustreznosti	Kriteriji varnosti in uporabnosti, ob upoštevanju podnebnih sprememb, so izpolnjeni.	Ni ukrepov
		Kriteriji varnosti in uporabnosti, ob upoštevanju podnebnih sprememb, niso izpolnjeni.	Ponovno načrtovanje
		Poslabšane mehanske značilnosti slojev pobočja	
		Znaki poškodb in porušitev pobočja	Interventni ukrepi

Pristopi za blažitev posledic podnebnih sprememb vključujejo gradbene ukrepe; za vsako geotehnično konstrukcijo in pričakovani vpliv podnebnih sprememb sledi ustrezen ukrep s seznama možnih ukrepov (gl. SafeLand, 2012). V tem prispevku obravnavamo samo ukrepe, ki so uporabni za pobočja in so hkrati na naravi temelječe rešitve. Iz preglednice 3 je razvidno, da nekateri ukrepi v celoti izpolnjujejo pogoje za na naravi temelječe rešitve. Za nekatere ukrepe pa je potrebna kombinacija na naravi temelječih rešitev in konvencionalnih rešitev z vgradnjo umetnih materialov.

Da ukrep obravnavamo kot na naravi temelječo rešitev, so bili v raziskavi opredeljeni naslednji pogoji: (1) za ukrep se uporabljajo naravni procesi, (2) ukrep zagotavlja ali izboljšuje družbene koristi, (3) ukrep zagotavlja ali izboljšuje gospodarske koristi, (4) ukrep zagotavlja ali izboljšuje okoljske koristi in (5) ukrep je koristen za biotsko raznovrstnost.

Pri analizah prilagajanja na podnebne spremembe se pojavi težava, kako uporabiti znane računske modele za geomehanske analize pobočij in kako vnesti vhodne podatke, ki čim bolj realno opisujejo pričakovane podnebne spremembe. Zato je v prispevku opisan koncept prilagajanja potencialno nestabilnih geokonstrukcij glede na pričakovane podnebne spremembe (slika 1), pri čemer so podnebne značilnosti, kot so padavine, temperatura, veter, morska gladina itd., opisane s signali podnebnih sprememb. Podnebne spremembe povzročijo učinke na tla in konstrukcije. Vsak signal povzroči enega ali več učinkov podnebnih sprememb. Signali in učinki podnebnih sprememb pa so vzrok za posledice podnebnih sprememb, ki se kažejo kot spremenjene fizikalne lastnosti tal in kot dodatni vplivi (obtežbe). Glede na predvideni odziv tal in konstrukcije na

pričakovane podnebne spremembe se zatem določijo potrebni geotehnični ukrepi za zagotavljanje varnosti in stabilnosti tal.

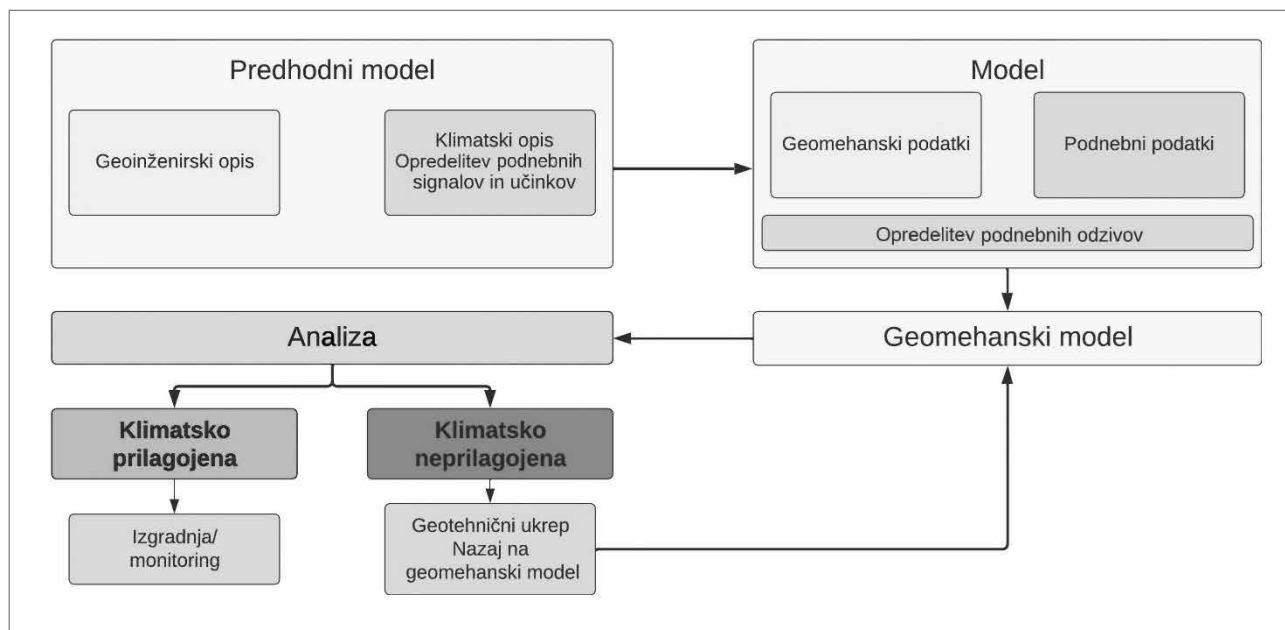
Pomembno je, da se za obravnavano geokonstrukcijo najprej opredeli, kateri so najpomembnejši signali podnebnih sprememb, katere učinke podnebnih sprememb povzročajo ter katere bi bile morebitne posledice zaradi signalov in učinkov. Signalov in posledičnih učinkov je za vsak primer več, zato je pomembno razumeti korelacije med posameznimi parametri podnebnih sprememb. Zato je bila v okviru omenjene delovne skupine izvedena raziskava (spletna anketa), v kateri so sodelovali geotehnični strokovnjaki iz evropskih držav, da bi podali oceno vpliva signalov podnebnih sprememb, učinkov na območja in konstrukcije ter za urbana območja in konstrukcije oceno najbolj problematičnih posledic. Iz rezultatov ankete je razvidno, da so v večini držav najbolj problematični signali podnebnih sprememb povečana ali zmanjšana količina padavin, povečano število ciklov dežja/suše in povečano število ciklov zmrzali/odmrznitve (ELGIP, 2022).

Oblikovana je bila metodologija za prepoznavanje podnebnih signalov, oceno vplivov podnebnih sprememb in zagotavljanje smernic za vključevanje podnebne spremenljivosti v geotehnično analizo in načrtovanje. Ta metodologija sledi postopkovnemu zaporedju, ki ga pogosto uporabljajo geotehnični inženirji pri ocenjevanju in načrtovanju znanih in novih geotehničnih struktur. Posamezni koraki tega zaporedja so prikazani na sliki 1. Poleg tega je ključno upoštevanje projektnih specifikacij iz Evrokoda 7 (SIST EN 1997-1, 2005).

V začetni fazi se izvajajo temeljite analize, ki jih opravljajo strokovnjaki s področij geotehnike, geologije, seizmologije in klimatologije. Glavni cilj analiz je razvoj modela za nadaljnjo

Preglednica 3: Ukrepi za zagotavljanje stabilnosti pobočij (vir: prilagojeno po Copobianco, V., idr., 2022)

	Opis ukrepa	Naravni ukrepi	Kamen, les	Umetni in reciklirani materiali
Površinska zaščita	Zatravitev, ozelenitev, posaditev dreves	✓		
	Ojačitev z geosintetiki			✓
	Drenažna odeja		✓	✓
	Protierozijski nasip obrežij		✓	
	Sidrane obloge	✓		✓
Prilagajanje geometrije pobočja	Odstranitev nestabilnega pobočnega materiala	✓		
	Odstranjevanje nestabilnih hribskih blokov	✓		
	Odvoz materiala z vozniških površin	✓		
	Zamenjava materiala z lahkim polnilom			✓
	Dodajanje materiala na peti nestabilnega pobočja		✓	
Spreminjanje režima odvodnjavanja	Površinska drenažna dela	✓	✓	
	Lokalno premeščanje materiala za povečano odtekanje vode	✓		
	Tesnjenje nateznih razpok v hribini	✓		
	Izolacijske pregrade, geomembrane			✓
	Vegetacijsko-hidrološki učinki	✓		
	Dela za nadzorovanje hidroloških vplivov	✓		
	Odvodni kanali	✓		
Spreminjanje režima podzemne vode	Plitvi jarki, napolnjeni z drenažnim materialom		✓	
	Globoki jarki, napolnjeni z drenažnim materialom		✓	
	Vrtine za podzemno odtekanje vode	✓		
	Drenaža za iztoke	✓		
	Drenažni tuneli, galerije, odtoki iz vodnjakov	✓		
Spreminjanje mehanskih lastnosti nestabilne površine	Rastlinje	✓		
	Zamenjava materiala površine		✓	
	Površinsko zgoščevanje tal	✓		
	Globinsko zgoščevanje	✓		
	Mehansko globinsko mešanje z apnom in/ali cementom			✓
	Nizkotlačno injektiranje s cementnim ali kemičnim vezivom			✓
	Injektiranje			✓
Prenos obremenitev na nosilne sloje	Vertikalne drenaže			✓
	Piloti		✓	✓
	Diafragme			✓
	Mehanski učinki s kesoni			✓
	Žebljanje			✓
	Mozniki in sidra			✓
	Sidranje v kamnino			✓
	Sidra			✓
Podporne konstrukcije	Armirana zemljina			✓
	Gabioni		✓	✓
	Kašte		✓	
	Suhe kamnite zložbe		✓	
	Težnostni zidovi		✓	✓
	Armiranobetonski zidovi			✓



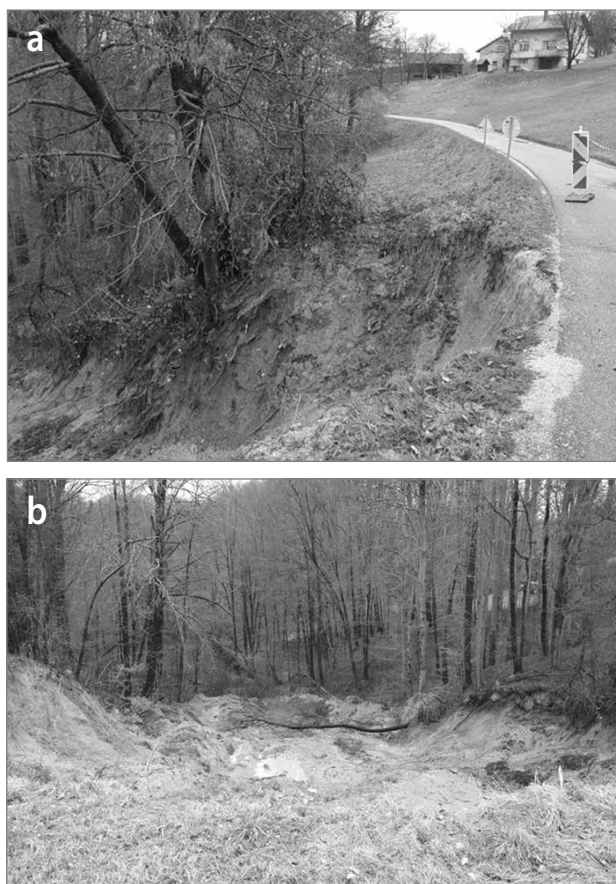
Slika 1: Zasnova za geomehansko analizo in načrtovanje geokonstrukcij s poznavanjem vplivov podnebnih sprememb (vir: avtorji)

geomehansko analizo. Če geomehanska analiza pokaže, da je konstrukcija prilagojena podnebnim spremembam, se postopek gradnje oziroma monitoring nadaljuje. Če pa se ugotovi, da konstrukcija ni prilagojena podnebnim spremembam, se izvedejo geotehnični ukrepi in se postopek analize ponovi.

V primeru zdajšnjih geokonstrukcij je skladnost mogoče doseči z modificiranjem geotehnične strukture, če je to izvedljivo, s tehničnimi ukrepi vzdrževanja. Seznam možnih strukturnih ukrepov za omilitev, dobro znanih v geotehničnem inženirstvu, je naveden v preglednici 3. Predlagani postopek za geomehansko analizo in načrtovanje je mogoče uporabiti za vse tipične geotehnične strukture, vključno s pobočji in nasipi, saj ne spreminja uveljavljenih temeljnih načel in analitičnih pristopov geotehničnega načrtovanja, temveč dodaja vidike, povezane s podnebjem.

3 Rezultati in razprava: primer uporabe koncepta prilagajanja potencialno nestabilnih geokonstrukcij glede na pričakovane podnebne spremembe

V preglednici 1 so prikazane pojavne oblike (tipi) nestabilnosti pobočij, ki so različne glede na geometrijo in slojevitosti pobočja, material nestabilne mase in vpliv podnebnih signalov in učinkov. Za vsak tip pobočja se izvede specifična geomehanska analiza in se izberejo ustrezni geotehnični ukrepi. Za prikaz



Slika 2: a) Tipični čelni odlom plazov kot posledica infiltracije vode v pobočje in hkratnega izlivanja meteorne vode s ceste in b) telo plazov z naravi zemljine na peti plazov (foto: Bojan Žlender)

uporabe koncepta je bil izbran primer pobočja pod cesto, s katere se prosto razliva meteorna voda. Prikazan je primer analize stabilnosti pobočja, kjer je verjetnost nastanka zemljinskega plazju. Upoštevana sta vpliv podnebnih sprememb in ukrep z uporabo na naravi temelječih rešitev.

3.1 Predhodni model

Namen analize je razumeti vzroke za morebitno nestabilnost plazju ter načrtovati in preveriti učinkovitost omilitvenih ukrepov, da se zagotovi podnebna prilagojenost pobočja, ceste in varnosti stanovanjskega objekta v neposredni bližini. Skladno s standardom Evrokod je življenjska doba konstrukcij in drugih običajnih objektov 50 let (SIST EN 1990, 2004).

S karte verjetnosti pojavljanja plazov je razvidno, da je obravnavana lokacija na območju velike verjetnosti pojavljanja plazov, z opozorilne karte erozije pa, da je na območju zahtevnih zaščitnih ukrepov. Ključni signali podnebnih sprememb so povečana količina padavin, povišana temperatura zraka in povečana hitrost vetra. Predhodna ocena geoloških razmer obravnavanega območja je podana na podlagi geološke karte obravnavanega območja. Oligocenske plasti pobočja so sestavljene iz sive laporaste gline in skrilavca, glinenega laporja in sljudnega skrilavca. Holocenske plasti so aluvialni nanosi, sestavljeni iz drobnozrnatih kamenčkov, peska, mulja in gline. Rezultati klasifikacije tal so bili pridobljeni v skladu s standardom SIST ISO TS 17892-4:2017. Ocenjena sta gladina in pretok podzemne vode, ki sta odvisna od letnega časa in količine padavin. Seizmični podatki upoštevajo priporočila standarda EN 1998-1: 2005, ki upošteva povratno dobo potresov 475 let. Območje, ki se obravnava, spada v 7. stopnjo po evropski makroseizmični lestvici. Glede na projektno karto pospeška tal je projektni pospešek tal za obravnavano območje 0,2 g (SIST EN 1998-1, 2005).

3.2 Model

Raziskave so pokazale, da so tla sestavljena iz plasti peščene gline, so lahke do srednje kompaktne konsistence in segajo 3 metre v globino. Globlje je glina srednje do težke konsistence, prehaja v poltrdno stanje in sega do globine 6 metrov. Še globlje je hribinska osnova laporja. Podnebni učinki, povezani s podnebnimi signali, so poslabšanje trdnosti materiala zaradi povečane zasičenosti z vodo, povečana vodoprepustnost, intenzivnejše preperevanje, zvišana gladina in povečan pretok podzemne vode, vključno s tlakom porne vode. Izvedena je bila geotehnična raziskava lokacije, ki je vključevala geodetski posnetek, sondiranje in vzorčenje tal, merjenje nivoja podzemne vode, terensko testiranje (SPT) in laboratorijske preiskave (razvrstitev tal, določitev gostote, neposredni strižni preizkus, preizkus vodoprepustnosti, edometerski preizkus). Določene

so bile lastnosti laporja in peščene gline. Model tal upošteva največji kot trenja in ničelni kot dilatacije. Po metodi Van-Genuchtena in Nielsena (1985) je bila določena karakteristična krivulja zemlja-voda na pobočju in pridobljena krivulja funkcije vodoprepustnosti.

Za vključitev podnebnih sprememb v model so bile upoštewane napovedane podnebne spremembe do leta 2050 in temu primerno povečane količine padavin. Izbrana je bila ocena trenutnih ekstremnih padavin (povratna doba 100 let) in padavin v letu 2050 za izbrano plazišče po scenariju podnebnih sprememb RCP4.5. Trenutna ekstremna količina padavin je bila opredeljena kot $P = 139$ mm/dan. Prihodnji ekstrem bo dosežen s povečanjem trenutne količine padavin za 7,2 % ($P = 149$ mm/dan). Računski postopki za določanje infiltracije vode v tla so kompleksni in vključujejo številne predpostavke (Yan in Jiao, 2018). V analizi je uporabljena enačba, ki jo je razvilo ameriško združenje gradbenih inženirjev (ASCE) (Pk, 2017).

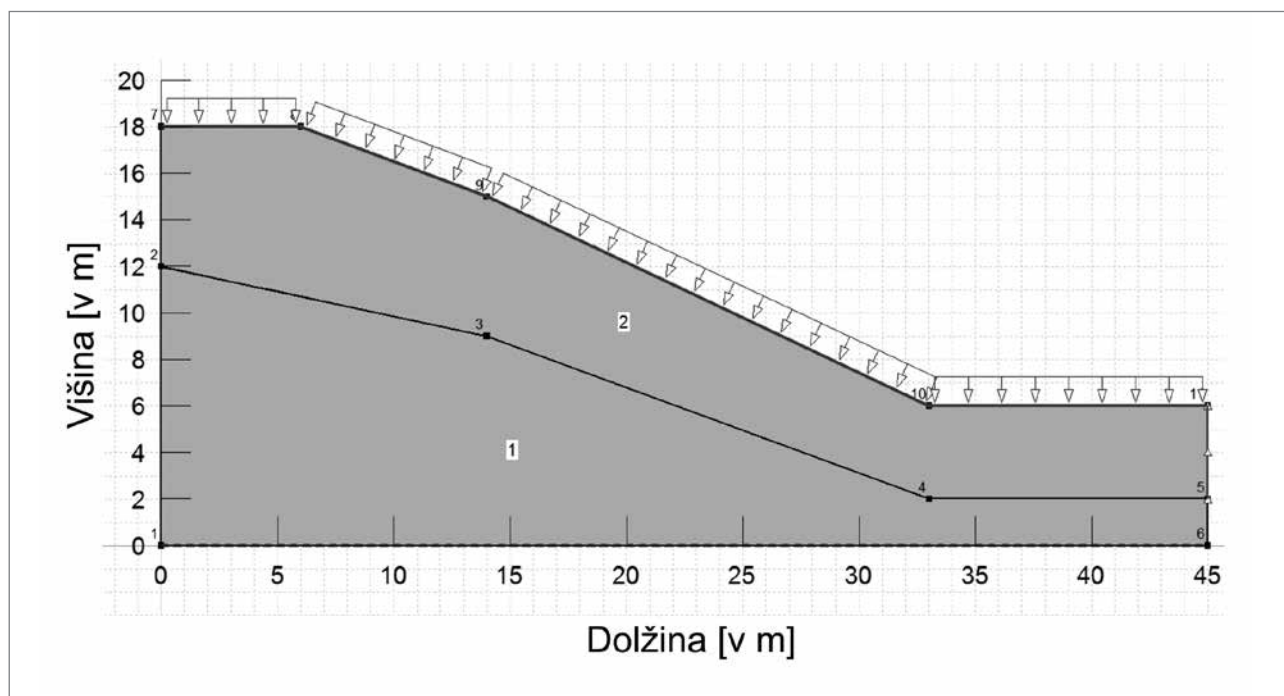
3.3 Geomehanski model

V tej fazi se geomehanski model pridobi z vključitvijo rezultatov modeliranja podnebja v geotehnični model in analizo vhodnih podatkov, ki izraža povečanje padavin z neto vodno infiltracijo, ovrednoteno na podlagi ekstremnih padavin. Ustvarjena sta bila dva modela, FEM (metoda mejnega ravnovesja) in LEM (metoda končnih elementov), z velikostjo mreže $1\text{ m} \times 1\text{ m}$. Pri metodi FEM se predpostavljajo mejni pogoji. Zajema proučevanje ravnovesja med togim telesom, kot je pobočje, in drsno površino poljubne oblike. Iz tega ravnovesja se izračunajo strižne napetosti in primerjajo z razpoložljivo strižno odpornostjo. LEM je močna alternativna metoda za analizo stabilnosti pobočij, je natančna, vsestranska in zahteva manj predhodnih predpostavk, zlasti glede mehanizma porušitve.

Geometrija modela je prikazana na sliki 3. Dimenzije modela so $45\text{ m} \times 20\text{ m}$, z opredeljenima dvema slojema tal, zgornja plast je peščena glina in spodnja plast je lapor. Predvidene so bile podnebne spremembe do leta 2050 in temu primerno povečane količine padavin. Za lokacijo plazju so bili uporabljeni podatki iz poročila o padavinskih spremembah. Izveden je bil izračun sprememb ravni padavin do leta 2050, ki predvideva povečanje količine padavin in zvišanje temperature za izbrano plazišče z uporabo scenarija podnebnih sprememb RCP4.5. Intenzivnost padavin je opredeljena kot podnebna sprememba in je trenutno, ob upoštevanju stoletne povratne dobe, 139 mm/dan, povečanje ekstremnih padavin zaradi podnebnih sprememb je 5-odstotno. Preglednica 4 prikazuje vhodne podatke obravnavanega numeričnega modela. Za lapor so bile izbrane privzete vrednosti, saj gre za intaktno kamnino in njegove lastnosti strižne trdnosti niso relevantne pri analizi pobočja.

Preglednica 4: Vhodni podatki numeričnega modela (vir: Bračko, T., idr., 2022)

	Enota	Peščena glina	Lapor
Prostorninska teža	γ (kN/m ³)	18,5	24
Kohezija	c (kPa)	2	200
Strižni kot	φ (°)	20	45
Volumetrična vsebnost vode	$VWC = V_w/V_s$ (-)	0,2	/
Prepustnost	$k_y = k_x$ (m/s)	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-11}$
Stisljivost	m_v (1/kPa)	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-8}$

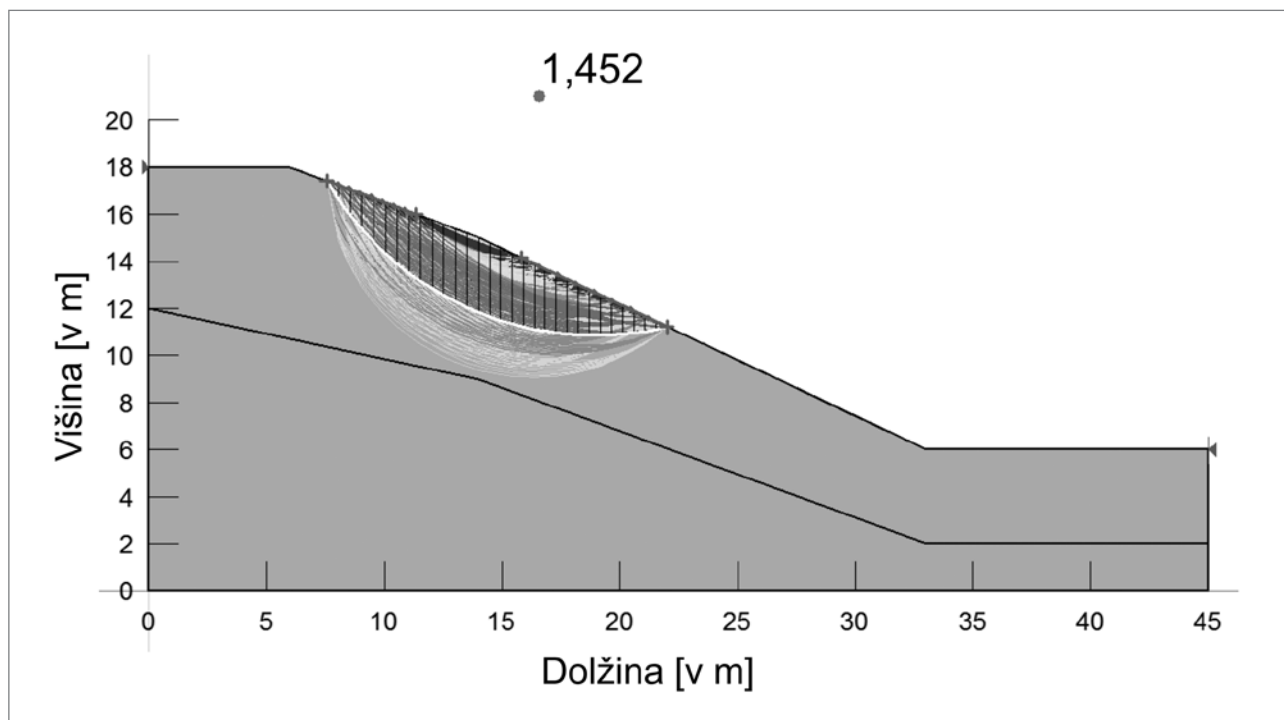
**Slika 3:** Geometrija in mreža numeričnega modela pobočja (vir: Bračko, T., idr., 2022)

Stabilnost pobočja je ocenjena z varnostnim faktorjem pobočja, pred padavinami in med njimi, z numeričnim modeliranjem FEM. Spremembe vsebnosti površinske vode in pornega tlaka v procesu infiltracije smo analizirali s programsko opremo SEEP/W modul GeoStudio. SLOPE/W je 2D program za modeliranje stabilnosti pobočij, ki zagotavlja široko paleto zmogljivosti. Program ima obsežen seznam materialov. Glavna prednost je, da lahko modeliramo delno zasičena tla. SEEP/W je modul pronicanja paketa GeoStudio in se lahko uporablja za simulacijo pretoka vode v nasičenih ali nenasasičenih tleh. Ker sta tako SEEP/W kot SLOPE/W del istega programskega paketa GeoStudio, omogočata preprosto spajanje in izračun faktorja varnosti za vse časovne korake simulacije.

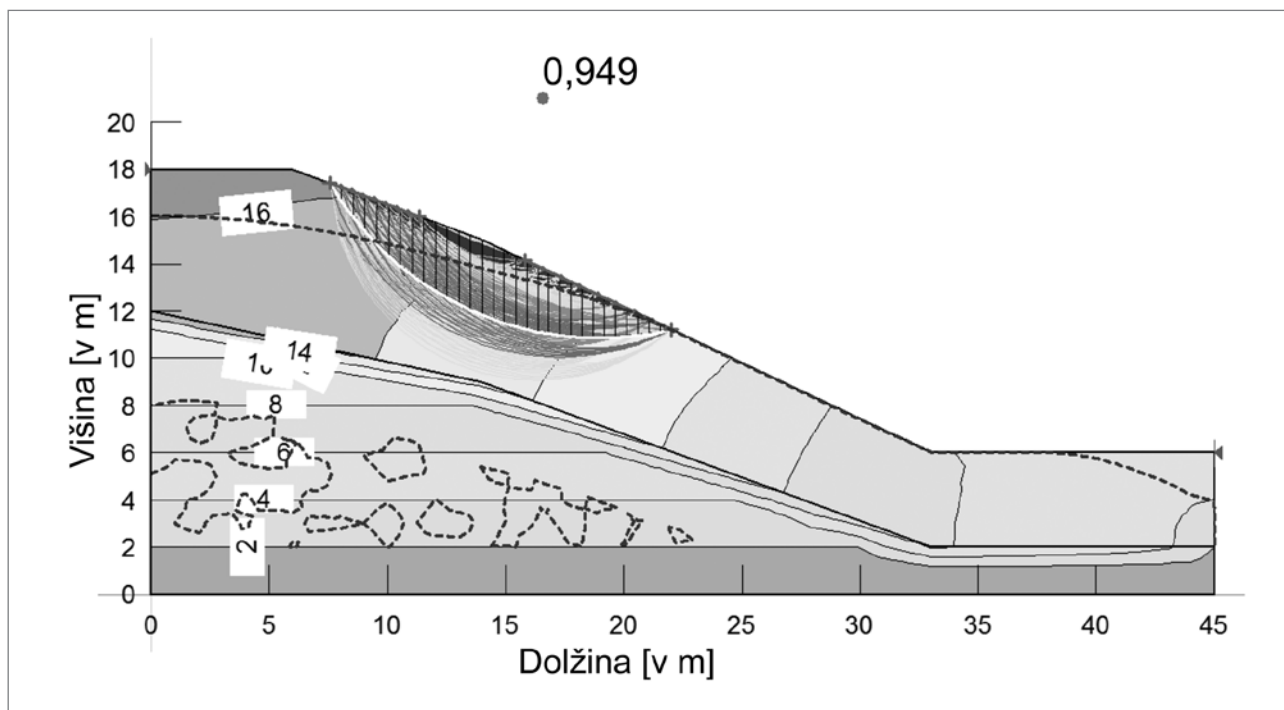
3.4 Analiza

Na podlagi rezultatov analize je mogoče oceniti podnebno prilagodljivost pobočja. Analiza dokazuje, da pobočje ni prilagojeno na predvidene podnebne spremembe in so potrebni prilagoditveni ukrepi. Analiza vključuje tri faze: prvo fazo, ki je začetno stanje, drugo fazo, v kateri so intenzivne padavine, ki trajajo tri dni, in tretjo fazo, ko padavine prenehajo.

Analiza upošteva vpliv podnebnih sprememb na nestabilnost pobočij zaradi povečanih padavin, povišane temperatura zraka in povečane hitrosti vetra. Ugotovljeno je bilo, da na stabilnost pobočij najbolj vplivajo povečane količine padavin, povišana temperatura zraka in povečana hitrost vetra pa sta po ocenah manj pomembni (ELGIP, Geotechnical Research in Europe,



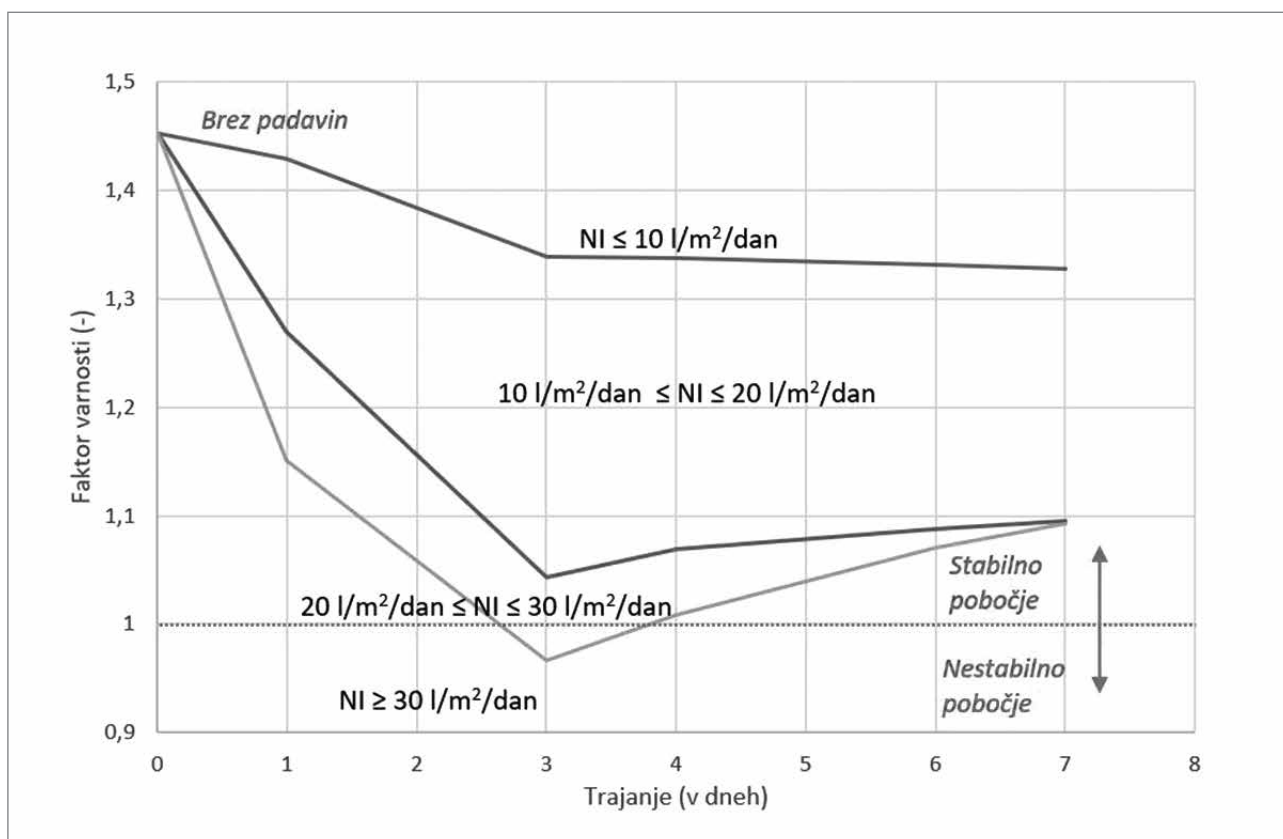
Slika 4: Kritična porušnica in faktor varnosti brez vpliva infiltracije vode (ni dežja) (ilustracija: avtorji)



Slika 5: Kritična porušnica in faktor varnosti (3 dni dežja, NI = 30 l/m²/dan) (ilustracija: avtorji)

2022), vendar je treba poudariti, da je neto infiltracija vode posledica vseh treh medsebojno delujočih podnebnih signalov. Posledično so glavni vplivi podnebnih sprememb na nestabilnost pobočij poslabšanje parametrov trdnosti materiala, povečano površinsko odtekanje vode, zvišan nivo in povečan pretok podtalnice ter sprememba pornega tlaka vode.

Analiza kaže, da faktor varnosti na stabilnost pobočja, ko ni dežja, zagotavlja stabilnost (slika 4). S časom trajanja padavin se faktor varnosti znižuje, in to v odvisnosti od količine padavin in s tem infiltracije vode v pobočje. Ko se poveča infiltracija vode v pobočje, se poveča porni vodni tlak in zato hkrati tudi vodoprepustnost zemljine v pobočju. Faktor varnosti pada z



Slika 6: Vpliv infiltracije vode v pobočje na časovni razvoj faktorja varnosti na stabilnost, pri hkratnem nižanju strižne trdnosti zemljine (ilustracija: avtorji)

naraščajočo infiltracijo vode v pobočje, pri hkratnem povečanju vodoprepustnosti. Pri tem je raziskava vodoprepustnosti zemljine v pobočju zelo pomembna, saj je ta težko natančno določljiva za razmere v naravi in pomembno vpliva na rezultate. Zanimivo je, da se stabilnost pobočja zmanjšuje zelo počasi, če je vodoprepustnost zemljine v pobočju dovolj majhna ($k \leq 10^{-7} \text{ m/s}$), kar je ugodno, saj pobočje ostane stabilno. Ko se vodoprepustnost poveča, se faktor varnosti na stabilnost pobočja znižuje hitreje, vendar do neke meje. Za analizirane podatke je ta čas tri dni, tudi če se padavine še nadaljujejo (slika 5). Za analizirane podatke je meja, ko bi pobočje še vedno ostalo stabilno, malo nad mejo $NI = 20 \text{ l/m}^2/\text{dan}$, ob predpostavki, da se ne bi hkrati neugodno spreminjali še vodoprepustnost in strižna trdnost zemljine v pobočju (slika 6).

Še ena težava je, da se s povečano infiltracijo vode v pobočje povečata tudi vlažnost zemljine v pobočju in porni vodni tlak, zato posledično strižna trdnost pade. Zato se faktor varnosti še bolj zniža. Odnos med faktorjem varnosti in strižno trdnostjo zemljine v pobočju je skoraj linearen. Rezultati analize so podrobneje navedeni v članku Bračko idr. (2022) in kažejo velik vpliv podnebnih sprememb na stabilnost pobočij. Za zagotovitev ustrezne stabilnosti pobočij je treba izvesti ukrepe, ki upoštevajo tudi pričakovane podnebne spremembe. Če pogoji

stabilnosti niso zadovoljeni, se postopek analize vrne na korak II. Koncept analize. Izvedejo se sanacijski ukrepi, ki ustrezajo na naravi temelječi rešitvi, tj. kamnita podporna konstrukcija, drenaža, odvodnjavanje ceste in zasaditev rastlinja. Po izvedbi ukrepov bi bilo koristno meriti pomike na cestišču in odtok vode v revizijskem jašku in na iztoku odtočnih cevi.

4 Sklep

Podnebne spremembe bodo v prihodnosti velik izziv. Pomembno je, da znamo najprej opredeliti vzročno povezavo med podnebnimi signali (podnebne značilnosti) in učinki (geološki in geomehanski opis) ter opredeliti posledice (odziv geokonstrukcij). Ker se pri geomehanskih analizah, v okviru katerih poskušamo proučiti posledice podnebnih sprememb, kažejo številne težave, ki s predpisi in standardi še niso rešene, je v članku podan koncept za podnebno prilagojeno geomehansko analizo in načrtovanje.

Za lažje razumevanje je koncept predstavljen na primeru stabilnosti pobočja, skupaj z rezultati analiz s programom SEEP/W modul GeoStudio. Sklep analize je, da so za zagotavljanje stabilnosti pobočja pogosto ključni neto infiltracija

vode v pobočje, vodoprepustnost zemljine in pretok podzemne vode v pobočju. Prikazani koncept analize bi se v prihodnosti lahko uporabil kot temelj za razvoj geomehanskih analiz, ki bi bile uspešne pri pravočasnem odkrivanju posledic podnebnih sprememb. Zato je treba izvajati dober monitoring pobočij in zbirati ustrezne podatke, ki bodo v prihodnje koristni za analize in proučevanje vpliva podnebnih sprememb na pobočja.

Tamara Bračko, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo, Maribor, Slovenija
e-naslov: tamara.bracko@um.si

Primož Jelušič, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo, Maribor, Slovenija
e-naslov: primoz.jelusic@um.si

Bojan Žlender, Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo, Maribor, Slovenija
e-naslov: bojan.zlender@um.si

Viri in literatura

- Andreea, C. (2016): Unsaturated slope stability and seepage analysis of a dam. *Energy Procedia*, 85, 93–98. doi:10.1016/j.egypro.2015.12.278
- Agencija Republike Slovenije za okolje (2021): *Podnebne spremembe 2021, Fizikalne osnove in stanje v Sloveniji*. Dostopno na: https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/publication-s/2021_11-Poro%C4%8Dilo%20IPPC%20Podnebje%202021.pdf (sneto 24. 11. 2023).
- Bertalančič, R., Dolinar, M., Draksle, A., Honzak, L., Kobold, M., Kozjek, K., idr. (2018): *Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja*. Dostopno na: https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/publications/OPS21_Porocilo.pdf (sneto 16. 9. 2023).
- Bračko, T., Žlender B., in Jelušič P. (2022): Implementation of climate change effects on slope stability analysis. *Applied Sciences*, 12(16), 8171. doi:10.3390/app12168171
- Capobianco, V., Uzielli, M., Kalsnes, B., Choi, J. C., Strout, J. M., von der Tann, L., idr. (2022): Recent innovations in the LaRiMIT risk mitigation tool: implementing a novel methodology for expert scoring and extending the database to include nature-based solutions. *Landslides* 19(7), 1563–1583.
- Chen, R., Liu, J., Ng, C. W. W., in Chen, Z. K. (2019): Influence of slope angle on water flow in a three-layer capillary barrier soil cover under heavy rainfall. *Soil Science Society of America Journal*, 83(6), 1637–1647. doi:10.2136/sssaj2019.05.0135
- Cho, S. E. (2017): Prediction of shallow landslide by surficial stability analysis considering rainfall infiltration. *Engineering Geology*, 231, 126–138. doi:10.1016/j.enggeo.2017.10.018
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., in Maginnis, S. (ur.). (2016): *Nature-based solutions to address global societal challenges*. IUCN International Union for Conservation of Nature. doi:10.2305/IUCN.CH.2016.13.en
- Davies, O. (2011): *Numerical analysis of the effects of climate change on slope stability*. Newcastle University. Doktorska disertacija. Newcastle, School of Civil Engineering and Geosciences. Newcastle University.
- Dyson, A. P., in Tolooiyan, A. (2019): Prediction and classification for finite element slope stability analysis by random field comparison. *Computers and Geotechnics*, 109, 117–129. doi:10.1016/j.compgeo.2019.01.026
- ELGIP (2022): *Climate change adaptation*. Dostopno na: <https://elgip.org/working-groups/climate-change-adaptation/> (sneto 16. 9. 2023).
- Evropska komisija (2023): *Nature-based solutions*. Dostopno na: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/environment/nature-based-solutions_en/ (sneto 20. 9. 2023).
- Evropska agencija za okolje(2022): *Responding to climate change impacts on human health in Europe: focus on floods, droughts and water quality*. Dostopno na: <https://www.eea.europa.eu/> (sneto 16. 9. 2023).
- Eionet Portal (2022): *Evropsko okoljsko informacijsko in opazovalno omrežje*. Dostopno na: <https://www.eionet.europa.eu> (sneto 16. 9. 2023).
- Evrokod: Osnove projektiranja (2004): SIST EN 1990:2004.
- Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila. (2005): SIST EN 1997-1:2005.
- Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe. (2005): SIST EN 1998-1:2005.
- Insana, A., Beroya-Eitner, M. A., Barla, M., Zachert, H., Žlender, B., van Marle, M., idr. (2021): Climate change adaptation of geo-structures in europe: Emerging issues and future steps. *Geosciences* (Switzerland), 11(12). doi:10.3390/geosciences11120488
- Klemen, K., Pergar, P., Fatur, M., Bevc Šekoranja, B., in Konda, K. (2020): Problematika načrtovanja sonaravnih ukrepov za celovito upravljanje padavinskih voda na urbanih območjih. *Gradbeni vestnik*, 69, 73–81.
- Krajnc, U. (2019): Podnebne spremembe in poplavna ogroženost urbanih območij z lastnimi padavinskimi vodami. *Gradbeni vestnik*, 68, 110–119.
- Kristl, Ž., Senior, C., in Temeljotov Salaj, A. (2020): Ključni izzivi prilagajanja podnebnim spremembam v gradbenem sektorju. *Urbani izziv*, 31(1), 40–50. doi:10.5379/urbani-izziv-2020-31-01-004
- Oggero, M., Insana, A., in Barla, M. (2021): *Climate change effects on slope stability. Challenges and innovations in geomechanics*. Springer International Publishing.
- Park, J., Vilayvong, K., Son, Y., Fujisawa, K., in Murakami, A. (2019): Slope stability evaluation of an agricultural embankment by statistically derived rainfall patterns. *Paddy and Water Environment*, 17(3), 303–313. doi:10.1007/s10333-019-00725-2
- Pk, S. (2017): *Effects of climate change on soil embankments*. Dostopno na: <https://core.ac.uk/download/pdf/154836464.pdf> (sneto 16. 9. 2023).
- Radinja, M., Atanasova, N., in Zavodnik Lamovšek, A. (2021): Vodarski pogled na uvajanje modro-zelene infrastrukture v mestih. *Urbani izziv*, 32(1), 28–39. doi:10.5379/urbani-izziv-2021-32-01-003
- Raymond, C. M., Frantzeskaki, N., Kabisch, N., Berry, P., Breil, M., Nita, M. R., idr. (2017): A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas. *Environmental Science & Policy*, 77, 15–24. doi:10.1016/j.envsci.2017.07.008
- SafeLand (2012): *SafeLand: Living with landslide risk in Europe: Assessment, effects of global change, and risk management strategies*. Dostopno na: <https://cordis.europa.eu/project/id/226479> (sneto 1. 9. 2023).
- SIST ISO TS 17892-4:2017: Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Laboratorijsko preskušanje zemljin – 4. del: Ugotavljanje zrnastostne sestave. (2017)

- Medvladni panel za podnebne spremembe (2022): Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Dostopno na: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/> (sneto 16. 9. 2023).
- Uzielli, M., Choi, J. C., in Kalsnes, B. G. (2017): *A web-based landslide risk mitigation portal*. 4th Workshop on World Landslide Forum. 431–438. doi:10.1007/978-3-319-53487-9_50
- Vahedifard, F., Williams, J. M., in AghaKouchak, A. (2018): Geotechnical engineering in the face of climate change: Role of multi-physics processes in partially saturated soils. *IFCEE 2018*, 353–364. doi:10.1061/9780784481585.035
- Van Genuchten, M. T., in Nielsen, D. R. (1985): Describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Ann. Geophys*, 3, 615–627.
- Vardon, P. J. (2015): Climatic influence on geotechnical infrastructure: a review. *Environmental Geotechnics*, 2(3), 166–174. doi:10.1680/envgeo.13.00055
- Varnes, D. J. (1978): Slope movement types and processes. V: Schuster, R. L., in Krizek, R. J. (ur.): *Landslides, analysis and control, transportation research board*, posebno poročilo št. 176, National Academy of Sciences, 11–33.
- Wang, Y., Guo, P., Dai, F., Li, X., Zhao, Y., in Liu, Y. (2018): Behavior and modeling of fiber-reinforced clay under triaxial compression by combining the superposition method with the energy-based homogenization technique. *International Journal of Geomechanics*, 18(12). doi:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001313
- Yan, C., in Jiao, Y.-Y. (2018): A 2D fully coupled hydro-mechanical finite-discrete element model with real pore seepage for simulating the deformation and fracture of porous medium driven by fluid. *Computers & Structures*, 196, 311–326. doi:10.1016/j.compstruc.2017.10.005
- Zhou, D., Zhang, Z., Li, J., in Wang, X. (2019): Seepage-stress coupled modeling for rainfall induced loess landslide. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 9(1), 7–13. doi:10.1016/j.taml.2019.02.006