

ZEMELJSKI PLAZOVI PRI OCENJEVANJU NEVARNOSTI ZARADI DELOVANJA DROBIRSKIH TOKOV

LANDSLIDES AT DEBRIS FLOW HAZARD ASSESSMENT

viš. pred. dr. Jošt Sodnik, univ. dipl. inž. grad.

jost.sodnik@tempos.si

TEMPOS, okoljsko gradbeništvo, d. o. o.,

Tehnološki park 21, 1000 Ljubljana

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,

Jamova c. 2, 1000 Ljubljana

prof. dr. Matjaž Mikoš, univ. dipl. inž. grad.

matjaz.mikos@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova

cesta 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

504.4:551.578-057.177

Povzetek | Drobirski tokovi tudi v Sloveniji predstavljajo naravno nevarnost, ki se je pogosto ne zavedamo niti ni primerno obravnavana v področni zakonodaji. Sam pojav drobirskih tokov je pogosto nevaren, povzroča veliko gmotno škodo in terja človeška življenja. To je tudi v Sloveniji pokazal dogodek novembra 2000 v Logu pod Mangartom. Ocenjevanje nevarnosti zaradi delovanja naravnih pojavov je logičen preventivni korak, ki je bil storjen na področju poplav in z njimi povezane erozije, medtem ko metodologija za ocenjevanje nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov ni predpisana. S pojavom drobirskih tokov je povezano tudi proženje zemeljskih plazov, katerega prostornina predstavlja ključni prispevek k magnitudi drobirskega toka, kar pa je eno ključnih vprašanj, ki v procesu ocenjevanja nevarnosti ostaja odprto in predstavlja izziv. Za primer plazu Stože nad Logom pod Mangartom novembra 2000 smo uporabili model proženja zemeljskih plazov LS-Rapid. Z modelom smo simulirali fazo proženja in določili prostornino splazelega materiala na pobočju Stože. Predlagani pristop in pridobljene izkušnje so lahko uporabni tudi na drugih območjih, kjer potencialno nestabilna območja predstavljajo nevarnost za proženje zemeljskih plazov in s tem tudi za nastanek drobirskih tokov. Prav tako predlagani pristop predstavlja korak v smeri oz. osnovo za nadaljnje raziskave v smeri razvoja metodologije in na koncu izdelavo posebnega pravilnika v podobni obliki, kot je bil izdelan pravilnik za področje poplav.

Ključne besede: drobirski tokovi, zemeljski plazovi, LS-Rapid, upravljanje tveganj, ocenjevanje nevarnosti

Summary | Debris flows present considerable threat in Slovenia. However, this natural phenomenon is ignored in engineering practice as well as in legislation covering hazard assessment and spatial planning. Debris flows are dangerous and can cause large damages and human casualties. Such a case in Slovenia was the November 2000 debris-flow event in Log pod Mangartom. The logical step would be a prescription of a methodology for debris-flow hazard assessment to prevent future events of this kind, but such a preventive step was only taken in the field of floods and flood related erosion. Debris flows are ignored in legislation covering hazard assessment and no changes are expected in the near future. Landslides can be closely related to debris flow initiation and debris flow magnitude and they are key questions when assessing debris flow hazard. The Stože landslide above the village of Log pod Mangartom from November 2000 was analysed with LS-Rapid, a landslide triggering model. With the model we simulated the

triggering phase and assessed the landslide volume on the Stože slope. The proposed approach and the gained experiences can be applicable in other torrential areas where potentially unstable areas and landslide-related debris flows present a threat. The proposed approach also presents a first step into the direction of a debris-flow hazard assessment methodology proposal, which should be implemented in national legislation in a similar way as the regulations for flood hazard and flood-related erosion.

Key words: Debris flows, landslides, LS-Rapid, risk management, hazard assessment

1 • UVOD

Drobirski tokovi v alpskem prostoru predstavljajo resno grožnjo, ki pa je zaradi svojega pojavljanja in neperiodičnosti pogosto spregledana tako pri zakonodajni obravnavi nevarnosti na območju hudournikov in vršajev kot tudi pri načrtovanju ureditev na območju hudournikov. Definicije in podrobni opisi drobirskega toka kot pojava masnega gibanja so bili že večkrat podani ((Sodnik, 2005), (Sodnik, 2009), (Jakob, 2005)). Drobirski tok lahko uvrstimo med oblike plazjenja tal oziroma obliko zemeljskega plazju z veliko hitrostjo premikanja. Izrazoslovje na področju zemeljskih plazov je kompleksno, v mednarodnem okolju se uporabljajo različne klasifikacije; pogosto se uporabljata originalna Varnesova klasifikacija pobočnega premikanja (Varnes, 1978) in klasifikacija zemeljskih plazov po Crudnu in Varnesu (Cruden, 1996). Skaberne (Skaberne 2001)) je podal svoj predlog slovenskega izrazoslovja pobočnih premikanj oziroma pobočnega transporta. V tem predlogu se angleški izraz »debris flow« posloveni v izraz »drobirski tok«. Dejansko gre za specifično obliko pobočnega premikanja, saj Varnesova klasifikacija pozna 29 ključnih besed za opis zemeljskih plazov, njegova naj-novejša posodobitev (Hungar, 2014) pa ponuja 32 tipov zemeljskega plazjenja.

V primerjavi s poplavami so drobirski tokovi bolj kompleksen pojav, ki ga je zelo težko napovedati, določiti obseg in posledice v primeru sprožitve. V nasprotju s poplavami, ki so periodičen pojav, neposredno povezan

s padavinami in dobro poznanimi lastnostmi vode in mehanizmom gibanja, je pri drobirskih tokovih neznank veliko več, zato je tudi ocenjevanje nevarnosti zahtevna naloga. Drobirske tokove ločimo na hudourniške in pobočno hudourniške drobirskie tokove (Sodnik, 2009). Pri hudourniških drobirskih tokovih gre za mobilizacijo materiala v strugi hudournika, medtem ko gre pri pobočno hudourniških drobirskih tokovih za nestabilnost na pobočju (običajno v obliki zemeljskega plazju), ki zdrsi v strugo hudournika in se pozneje zaradi zasičenja z vodo preoblikuje v drobirski tok. Pobočno hudourniški drobirski tokovi so praviloma nevarnejši, saj so magnitude večje, prav tako so hujše posledice. Primer pobočno hudourniškega drobirskega toka je drobirski tok v Logu pod Mangartom, ki je povzročil veliko gmotno škodo in terjal 7 življenj (Četina, 2006). Tudi v naši raziskavi se bomo ukvarjali s pobočno hudourniški drobirskimi tokovi, kjer bomo obravnavali proženje zemeljskih plazov kot glavni prispevek materiala za oblikovanje drobirskega toka.

Drobirski tok ima tri faze: proženje, gibanje in odlaganje (Mikoš, 2001).

Pri fazi proženja se srečamo z vprašanjem, kdaj, kje in koliko materiala se lahko sproži in preoblikuje v drobirski tok. Vprašanje je tudi, kdaj je povezano s padavinami in zemeljskim plazom ali potresom, ki je prav tako lahko eden od vzrokov proženja drobirskih tokov. Vprašanje, kje, je povezano s topografijo terena (naklon, konkavnost ali konveksnost),

usmerjenostjo terena glede na lego in bližino hudourniške struge in seveda z geologijo in samo sestavo tal, ki mora ustrezati pogojem za proženje materiala in s tem oblikovanjem drobirskega toka. Koliko materiala se lahko sproži, je v veliki meri odvisno od geologije, naklona terena in od količine vode, ki je na voljo za transport materiala na dolvodno ležeče območje, ki ga pogosto predstavlja hudourniški vršaj. Magnituda drobirskega toka je celotna prostornina drobirja, sproženega v enem dogodku, ne glede na število zdrsov. In prav določitev magnitude kot rezultata faze proženja je bistvena za ocenjevanje nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov. Za ocenjevanje magnitude drobirskih tokov so bile različne empirične metode, katerih pregled je podan v (Sodnik, 2005) ter (Sodnik, 2006). Problem empiričnih metod je podoben kot pri metodah za prepoznavanje nevarnih območij, saj je posamezna metoda vezana na območje razvoja. Problem pri ocenjevanju magnitude pa je še toliko večji, ker je za magnitudo poleg morfoloških parametrov treba upoštevati še zelo lokalno specifične parametre, kot so geološka sestava in padavine. Z razvojem novih orodij in modelov se je ponudila tudi možnost uporabe modelov proženja zemeljskih plazov (Sassa, 2010) za potrebe ocenjevanja magnitude potencialnih drobirskih tokov v procesu ocenjevanja nevarnosti. Problem določanja magnitude drobirskega toka je eden ključnih parametrov, ki vpliva na rezultate modela, podobno kot izbrani pretok s povratno dobo pri ocenjevanju nevarnosti zaradi poplav. Magnituda pobočno hudourniških drobirskih tokov je povezana z nestabilnostjo na pobočjih ob hudournikih oz. pojavljanjem zemeljskih plazov v prispevnem območju hudournikov.

teh pojmov je naslednja in prikazana na primeru poplav.

Poplave so naravni pojav, ki lahko v prostoru pomeni nevarnost. Dokler se ta pojav dogaja zunaj prisotnosti človeka in z njim povezane infrastrukture, je to samo pojav. Ko se človek naseli na poplavnem območju ali na poplavnem območju zgradi hišo,

2 • UPRAVLJANJE TVEGANJ IN OCENJEVANJE NEVARNOSTI

Ko govorimo o naravnih pojavih in z njimi povezanimi naravnimi nesrečami, se pojavljajo različni izrazi, kot so nevarnost, ogroženost, tveganje, ranljivost. Pregled izra-

zoslovja je podan v (Đurović, 2006), medtem ko je povezavo te terminologije na področju poplavne problematike predstavil (Mikoš, 2007). Najbolj enostavna obrazložitev vseh

se s tem izpostavi tveganju, ker je sam in njegov objekt ranljiv. Kombinacija ranljivosti in objektivne nevarnosti pomeni ogroženost. Ko se poplave kot naravni pojav zgodijo na območju, kjer je prisoten ranljiv človek in njegova infrastruktura, lahko govorimo o naravni nesreči. Na ogroženost torej vplivata tako objektivna nevarnost pojava v prostoru kot ranljivost človeka oz. njegove infrastrukture in s spreminjanjem obeh lahko spreminjamo ogroženost in s tem tveganje za človeka. Tako govorimo o upravljanju tveganj oz. rizičnem menedžmentu. Prvi korak, verjetno najpomembnejši v procesu rizičnega menedžmenta, je ocenjevanje nevarnosti (ang. hazard assessment), s katerim dobimo podatek o dejanski nevarnosti, ki zaradi izbranega pojava obstaja na določenem območju. Ocena nevarnosti je osnova za vse nadaljnje ukrepe in je zato pravilnost te ocene zelo pomembna. To je verjetno tudi razlog, zakaj se pri vseh naravnih pojavih največ pozornosti namenja prav kvalitetni in predvsem zanesljivi oceni nevarnosti.

Drobirski tokovi so z vidika ocenjevanja nevarnosti zelo specifičen pojav. Glavni problem je neperiodičnost pojava, prav tako se pojavlja vprašanje, kje se drobirski tokovi sploh lahko pojavijo. Poplave so v nasprotju z drobirskimi tokovi periodične in se pojavljajo z različnimi magnitudami oz. povratnimi dobami skoraj vsako leto. Poleg tega je povsem jasno, da lahko na vsakem vodotoku pričakujemo poplave, vprašanje je samo intenziteta poplav pri izbrani povratni dobi. Tudi za snežne plazove obstaja katastrofa, ki je bil izdelan leta 1994, v njem pa so označena območja, kjer se pojavljajo snežni plazovi (Pavšek, 2002).

Pri drobirskih tokovih je torej ocenjevanje nevarnosti precej zapleteno in je najprej treba določiti, na katerih območjih se drobirski tokovi sploh pojavljajo, šele nato se lahko govori o ocenjevanju nevarnosti v smislu priprave kart nevarnosti in pozneje ogroženosti, kar je napisano v prejšnjem poglavju o izvajanju rizičnega menedžmenta. Poleg tega gre pri ocenjevanju nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov še za vprašanje kompleksnosti pojava, ki ga določa več dejavnikov, med drugim reološke karakteristike mešanice in magnituda dogodka. Ravno zaradi kompleksnosti pojava so se pojavile različne metode in pristopi pri ocenjevanju nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov. Postopek ocenjevanja nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov po korakih je podan v (Jakob, 2005).

Z dogodkom novembra 2000 v Logu pod Mangartom se je izraz »drobirski tok« začel pogostejše uporabljati tudi v Sloveniji. Pojavila se je tudi definicija drobirskega toka: drobirski tok je gravitacijski (hiperkoncentrirani) tok mešanice zemljin, hribin (skal), vode in/ali zraka, ki je sprožen z nastankom plazu pri velikem vtoku vode (Ribičič, 2001). Prej so se dogodki na hudournikih večkrat poimenovali murasti tok (Mikoš, 2000), hudourniški izbruh, hudourniška lava in podobno. Od takrat so se tudi na temo drobirskih tokov začele opravljati različne raziskave, ki so bile povezane tudi s poznejšimi aktualnimi dogodki na Koseču in na plazu Slano blato. Večina raziskav je bila namenjena analizi preteklih dogodkov in oceni nevarnosti ob morebitni ponovitvi. Pregled raziskav je podan v (Sodnik, 2009). Velik problem pri raziskavah je vedno predstavljalo pomanjkanje zgodovinskih podatkov o preteklih dogodkih, kar je področje, kjer Slovenija precej zaostaja za sosednjimi državami v alpskem prostoru (Italija, Avstrija, Švica in Nemčija). Razlog za pomanjkanje podatkov o drobirskih tokovih lahko iščemo tudi v tem, da se ta termin v preteklosti ni uporabljal in so tudi dejanski drobirski tokovi, ki so bili zavedeni v arhivih takratne hudourniške službe, poimenovani drugače in jih je tako težko ločiti od drugih ekstremnih dogodkov na hudournikih.

Zakonska podlaga za ocenjevanje ogroženosti v Sloveniji je Zakon o vodah (Zakon, 2002), kjer so definirana ogrožena območja in predpisane prepovedi za posege na teh območjih. Ta območja se delijo na poplavna, erozijska, plazljiva (plazenje tal in zemeljski plazovi) in plazovita (plazenje snega in snežni plazovi). Pozneje sta bila za področje poplav in s poplavami povezane erozije sprejeta Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti (Pravilnik, 2007) in Uredba o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja (Uredba, 2008). V Pravilniku je predpisana metodologija za izdelavo kart poplavne nevarnosti (razdelitev na razrede) in kart poplavne ogroženosti.

Z omenjenima dokumentoma je Slovenija naredila velik korak naprej na področju poplavne problematike in se oba dokumenta v praksi redno uporabljata za vse posege in tudi oblikovanje prostorskih aktov na poplavno ogroženih območjih.

Prvi problem uporabe zgoraj omenjenih pravilnikov je ta, da se praviloma izdelujejo le karte nevarnosti, saj za izdelavo kart ranljivosti ni predpisana podrobna metodologija, zato se tudi karte ogroženosti ne izdelujejo pogosto oz. so kar enačene s kartami nevarnosti.

Drugi problem pa je beseda »erozija« v (Pravilnik, 2007). Za ocenjevanje erozijske nevarnosti ni predpisana metodologija, ampak je predpisana samo izdelava kart erozijske nevarnosti, ki temelji na debelini odnesenega oz. odloženega materiala pri pretokih z različnimi povratnimi dobami. Take karte erozijske nevarnosti so za zdaj izdelane predvsem po strokovni oceni izdelovalca, modeliranje erozijskih procesov se za razliko od poplav v praksi ne izvaja niti za to ne obstaja enotne metodologije. Potem se pojavi še vprašanje hudournikov. Kar se tiče poplavne problematike, je ocenjevanje nevarnosti lahko podobno kot pri drugih vodotokih, pri vprašanju erozijske nevarnosti pa je situacija na hudournikih precej bolj zapletena, saj so količine materiala, ki se transportira ob visokih pretokih, precej večje kot pri nižinskih vodotokih, procesi so bistveno bolj intenzivni. In ko govorimo o ocenjevanju erozijske nevarnosti na hudournikih, ki je (glede na (Pravilnik, 2007)) vezana na povratne dobe pretokov, se vprašamo, kam spadajo drobirski tokovi, ki so pogosto kombinacija zemeljskega plazu in povišanega pretoka (Log pod Mangartom, Koseč, Čedca nad Jezerskim), ne pa samo povečane transportne sposobnosti, kot je to pri hudourniških poplavah.

Naš predlog je, da se drobirski tokovi opredelijo kot poseben pojav in da jih ni mogoče enačiti z erozijsko problematiko na vodotokih in hudournikih ter da potrebujejo ločeno obravnavo tudi na zakonodajni ravni, kjer bi bilo treba pojav drobirskih tokov, podobno kot zemeljskih in snežnih plazov, opredeliti kot samostojen problem in mu predpisati samostojno metodologijo za ocenjevanje nevarnosti in ogroženosti. Na nujnost ocenjevanja nevarnosti po ločeni metodologiji lahko pokaže že primer Loga pod Mangartom, kjer po nobeni zdajšnji metodologiji ne bi mogli predvideti posledic dogodka, ki je terjal kar 7 življenj in povzročil veliko grotne škode. Enako ne moremo z obstoječo metodologijo oceniti ogroženosti naselja Kropa zaradi drobirskega toka, ki se je med poplavami septembra 2007 sprožil na hudourniku Hrenovec, a se je k sreči ustavil na položnejšem odseku in se ni premaknil do naselja (Sodnik, 2007).

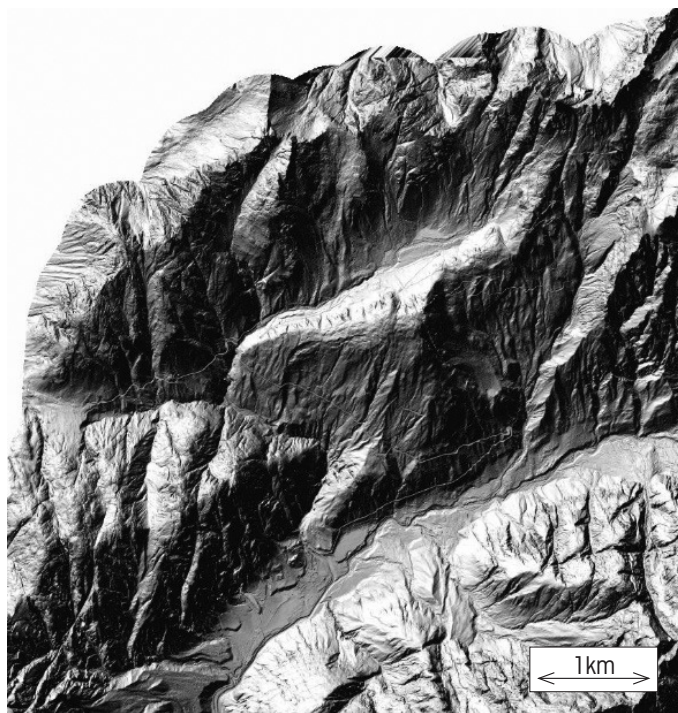
3 • MODELIRANJE PROŽENJA ZEMELJSKEGA PLAZU STOŽE

3.1 Zemeljski plaz Stože in drobirski tok v Logu pod Mangartom

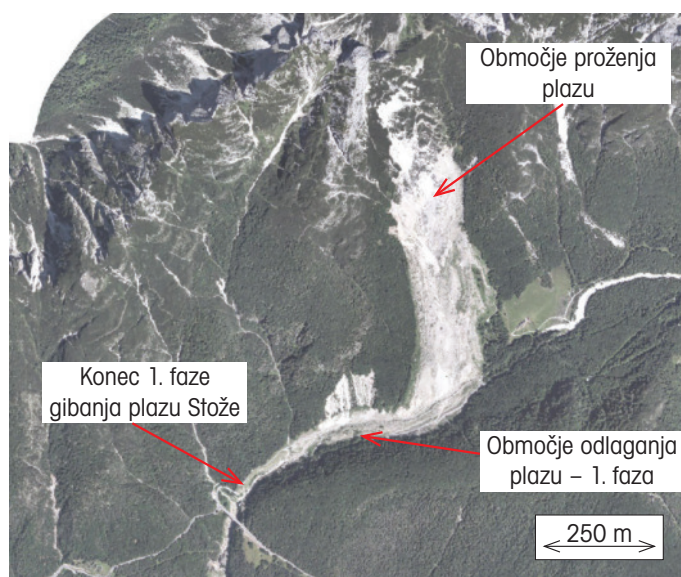
Log pod Mangartom v Sloveniji na področju raziskovanja drobirskih tokov predstavlja zelo pomembno območje, saj je to vas leta 2000 zasul katastrofalen drobirski tok, ki je terjal 7 življenj, in je s tem dogodkom pojav drobirskih tokov izpostavil kot pomembno raziskovalno

temo in hkrati enega od bolj nevarnih naravnih pojavov, ki se lahko zgodijo tudi v slovenskih hudournikih. Dogodek v Logu pod Mangartom je potekal v dveh fazah, 15. in 17. novembra 2000. Najprej se je 15. novembra 2000 na pobočju Stože sprožil zemeljski plaz, ki se je odložil v strugi Mangartskega potoka. Mikoš et al. (2004) je dogodek opisal kot drobirski

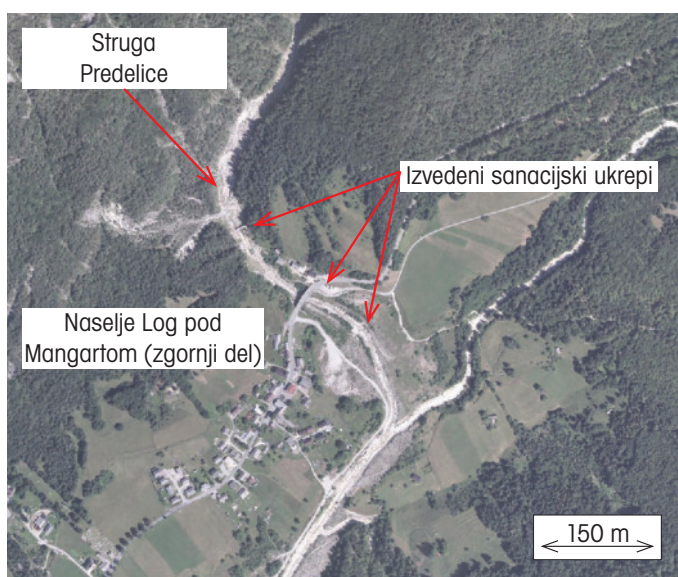
plaz (v angleščini kot debris flow slide), ki se je sprožil na pobočju Stože in zdrsnil v strugo Mangartskega potoka kot suhi drobirski tok (ang. dry debris flow). Pozneje se je zaradi močnega deževja in namakanja odložene mase zaradi dotoka vode po strugi Mangartskega potoka odloženi material relativno suhega drobirskega toka ponovno mobiliziral in se spremenil v mokri drobirski tok (angl. wet debris flow) ter po strugi Predelice potoval do naselja Log pod Mangartom, kjer je povzročil veliko škodo in smrtne žrtve. Širše območje



Slika 1 • Območje Loga pod Mangartom in območje plazu Stože (levo digitalni ortofoto – DOF, desno LiDAR). (Vir: spletni Atlas okolja)



Slika 2 • Območje proženja plazu in odlaganja v Mangartski potok. (Vir: spletni Atlas okolja)



Slika 3 • Območje odlaganja drobirskega toka v Logu pod Mangartom. (Vir: spletni Atlas okolja)

plazu Stože in vasi Log pod Mangartom je prikazano na sliki 1. Več o dogodku je opisano v (Mikoš, 2004), (Četina, 2006) in (Baron, 2013). Zanimivo je dejstvo, da je slovenski izraz drobirski plaz (ang. debris flow slide), ki ga je za opis dogodka 15. novembra 2000 (prva faza) uporabil Mikoš (Mikoš, 2004), našel mesto tudi v najnovejši posodobitvi Varnesove klasifikacije zemeljskih plazov (Hungar, 2014).

Obravnavano območje je sicer alpska dolina zahodno od Mangarta (2679 m) v SZ Sloveniji. Topografija je zelo pestra, kar se odraža v 700 m višinske razlike na razdalji 1,7 km. Površje je bilo oblikovano z ledeniki v dobi pleistocena. Območje Mangarta in okolice sestavljajo zgornje triasne kamnine, ki jih sestavljajo trije glavni tipi, in sicer kordevolski skladovit in tankoplastnat dolomit na SV delu območja, triasni laporvec, glinavec in apnenec v osrednjem in zahodnem delu ter v spodnjem delu v glavnem dolomit. Geološka sestava na območju proženja plazu (slika 2) je zelo neugodna, saj se je plaz sprožil v sedimentih ledeniške morene, pobočnih gruščih ter koluviji, ki so bili odloženi na neprepustnih slojih triasnih apnencev in marmorjev. Spodnje neprepustne plasti predstavljajo zelo dobre pogoje za čezmerno saturacijo zgornjih plasti, bogatih z glinami, kar lahko vodi v nestabilne pogoje (Baron, 2013).

Območje Loga pod Mangartom (slika 3) in primer drobirskega toka na tem območju je zelo zanimivo in primerno za našo raziskavo zato, ker je bilo v preteklosti opravljenih veliko raziskav, ki so bile izvedene na področju geologije, geomorfometrije, hidrologije, hidravlike in hidravličnega modeliranja ter geotehnike. Raziskave so bile opravljene z namenom pojasnitve dogodka in pa ocene potencialne nevarnosti ponovitve dogodka, saj je v zaledju še veliko materiala, ki bi se lahko ponovno spremenil v drobirski tok in ogrozil naselje Log pod Mangartom.

Na področju matematičnega modeliranja so bile narejene študije s poanalizo dogodka za umerjanje modela in za analizo posledic morebitne ponovitve dogodka ((Fazarinc, 2002), (Hojnik, 2001), (Mikoš, 2006), (Četina, 2006)). Opravljene so bile analize materiala za namen določanja reoloških karakteristik in analiziranja lastnosti materialov, ki bi lahko pripeljali do sprožitve (Petkovšek, 2002). Dogodek v Logu pod Mangartom pa je pritegnil tudi pozornost tujih raziskovalcev, ki so s pomočjo snemanja iz zraka in geološkega kartiranja izvedli kartiranje plazu in njegovih glavnih lastnosti (Baron, 2013).

Omenjene raziskave pomenijo neke vrste preboj v Sloveniji pri raziskavah na področju drobirskih tokov tako z vidika geotehnike kot tudi hidrotehnike in upravljanja hudournikov. Na podlagi teh raziskav so bili načrtovani in izvedeni tako sanacijski ukrepi kot omilitveni ukrepi za preprečevanje oz. omilititev posledic morebitne ponovitve dogodka, ki glede na raziskave ni izključen (Četina, 2006).

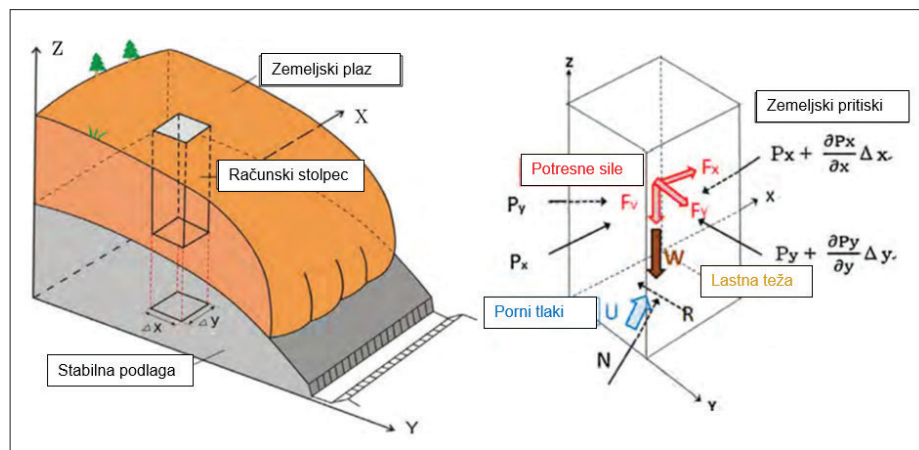
In ravno ta dobra pokritost z raziskavami dogodka je razlog, da je to območje primerno tudi za naše raziskave, za vpeljavo novih metod in modelov in omogočena je primerjava pristopov z že izvedenimi ter primerjava rezultatov. Glavna prednost izbranega območja pa je dejstvo, da imamo za ta primer dobirskega toka relativno veliko podatkov.

3.2 Model proženja LS-Rapid

Kot odgovor na pomanjkanje modelov za celovito modeliranje (proženje, gibanje in odlaga-

ganja plazu. Večina analiz mejnega stanja zemljin (Fellenius, Bishop, Janbu, Spenser) upošteva, da se pri sprožitvi plazu stabilnost poruši na celotni drsni ploskvi hkrati, medtem ko model LS-Rapid upošteva, da porni tlaki v zemljini naraščajo različno in da se pojavijo cone nestabilnosti, ki se širijo in pripeljejo do porušitve celotnega območja.

Glavna predpostavka modela je, da se vsa potencialna energija zemljine odraža kot strižna energija oz. sila na drsni ploskvi. Kinetična energija se zmanjšuje zaradi medsebojnih trkov delcev v masi, zaradi prenosa gibalne količine na zajeto maso plazu in gibanja delcev preko neravnin in grap v prostoru. Model ima vgrajeno funkcijo izgube/disipacije energije brez trenja za specifično mrežo in časovni korak z upoštevanjem mejnih vrednosti hitrosti in/ali debeline. Teoretične osnove modela so prikazane na sliki 4.



Slika 4 • Teoretična osnova modela LS-Rapid, povzeto po (Sassa, 2010).

nje) je bil razvit model LS-Rapid, ki je namenjen modeliranju vseh treh faz zemeljskih plazov. Razvit je bil v okviru ICL (ang. International Consortium of Landslides) (Sassa, 2010). Model je zasnovan na način, da kot sprožilne faktorje upošteva padavine in potres. Možna je tudi kombinacija obeh faktorjev. Je prvi model, ki simulira fazo proženja, fazo gibanja in fazo ustavljanja oz. odlaganja. Model je nastal kot nadgradnja teorije o porušitvah pri zemeljskih plazovih, modela gibanja ter znanja, pridobljenega v geotehničnem laboratoriju pri uporabi dinamičnega strižnega obroča z upoštevanjem obremenitev. Osnova modela je strižna trdnost materiala, ki je načeloma merljiva v laboratoriju in s tem lažje določljiva. Za upoštevanje vpliva potresa je možen vnos dejanskih posnetkov potresnih valov – meritev. Polega faze gibanja je možno simulirati tudi mobilizacijo materiala na poti

Osnovna enačba modela je naslednja:

$$\ddot{\mathbf{m}} = (\bar{\mathbf{W}} + \bar{\mathbf{F}}_v + \bar{\mathbf{F}}_x + \bar{\mathbf{F}}_y) + \left(\frac{\partial \bar{\mathbf{P}}_x}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial \bar{\mathbf{P}}_y}{\partial y} \Delta y \right) + \bar{\mathbf{R}} + \alpha \frac{1}{2} m |\bar{\mathbf{v}}| \bar{\mathbf{v}}^2 \quad (1)$$

Pri čemer je:

$\ddot{\mathbf{a}}$: pospešek

m : masa

$\bar{\mathbf{W}}$: lastna teža

$\bar{\mathbf{F}}_v$, $\bar{\mathbf{F}}_x$ in $\bar{\mathbf{F}}_y$: potresne (seizmične) sile v različnih smereh

$\bar{\mathbf{P}}$: bočna sila zaradi tlaka

$\bar{\mathbf{R}}$: strižna trdnost/odpornost, vključno z učinkom pornih tlakov U

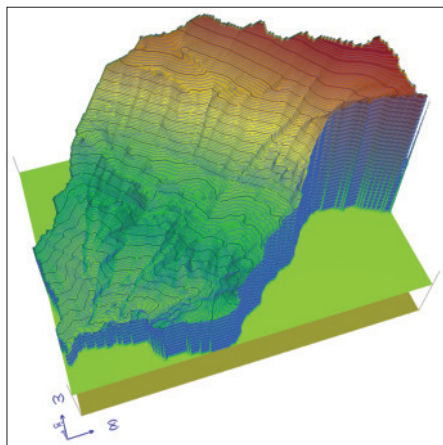
$\bar{\mathbf{v}}$: hitrost

α : dimenzijski koeficient za upoštevanje izgube/disipacije energije (m^{-1})

Sicer je model, njegovo teoretično ozadje in delovanje, podrobno opisan v (Sassa, 2010).

Pri simulaciji, v kateri so kot sprožilni faktor upoštevane padavine, sta ključna parametra modela faktor pornih tlakov r_u in rezidualna nedernirana strižna trdnost τ_{ss} . Za določanje parametra τ_{ss} je bil razvit strižni aparat (undrained dynamic – loading ring – shear apparatus), vendar ima omenjeni aparat določene omejitve, saj omogoča vgradnjo vzorca z $d_{max} = 2$ mm. To za naše razmere v alpskem prostoru, kjer prevladujejo bolj grobe frakcije, pomeni, da je tak aparat manj uporaben. Zaradi te omejitve smo v svoji raziskavi predpostavili določene načine določanja tega ključnega parametra modela, ki so se z občutljivostno analizo potrdile in izkazale za uporabne v nadaljnjih simulacijah.

Sicer je osnova modela digitalni model reliefa (DMR) s poljubno resolucijo, na podlagi katere se generira osnovna geometrija modela. Kar se tiče geometrije in debeline preperine, je treba definirati dva od treh podatkov. Prvi in obvezni podatek je višina celic (ang. slope surface), ki je definiran že z uvozom DMR, potem pa je treba dodati še podatek o debelini preperine na izbranem območju, kar se uredi z neposrednim podatkom o debelini preperine v izbrani celici ali za celotno območje (ang. sliding mass thickness), lahko pa se definira globina drsine oz. absolutna nadmorska višina stabilne podlage (ang. sliding surface elevation).



Slika 5 • Primer osnovne geometrije modela v programu LS-Rapid.

Zemljinam v modelu je treba določiti naslednje parametre, za katere so podane tudi neke okvirne vrednosti:

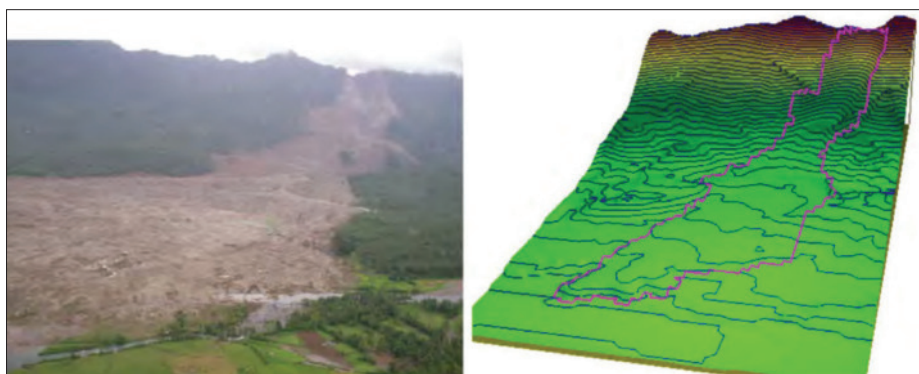
- Koeficient mirnega zemeljskega pritiska (Lateral pressure ratio k): 0,30–0,60
- Strižni kot zemljine (Friction coefficient inside landslide mass ϕ_i): (°) 0,36–0,58
- Strižni kot zemljine na drsni ploskvi takoj po porušitvi (Friction coefficient

during motion at sliding surface ϕ_m): (°) 0,46–0,70

- Nedernirana strižna trdnost med gibanjem oz. rezidualna strižna trdnost (Steady state shear resistance at sliding surface ϕ_p) (kPa): 5–50
- Koeficient pornih tlakov (Rate of excess pore-pressure generation r_u): 0,0–1,0
- Maksimalni strižni kot zemljine (Peak friction coefficient at sliding surface ϕ_p): (°) 0,65–0,78
- Maksimalna kohezija zemljine (Peak cohesion at sliding surface c_p) (kPa): 10–100
- Specifična teža zemljine (Unit weight of mass γ_m) (kN/m³)

Fakulteta za gradbeništvo Univerze na Reki in Univerza Kjoto. V nadaljevanju so naštet primeri nekaterih aplikacij modela na področju poanalize preteklih plazov in ocenjevanja nevarnosti zaradi delovanja zemeljskih plazov. Podani so tako primeri iz Japonske oz. primeri, kjer so model uporabljali njegovi avtorji, kot tudi iz sosednje Hrvaške, kjer je bil model uporabljen na treh območjih.

Plaz Leyte, Filipini 2006 (Sassa, 2010)
Izvedena je bila poanaliza katastrofalnega plazu prostornine med 20.000.000 in 30.000.000 m³, ki se je sprožil kot posledica dolgotrajnih padavin in potresa. Poudarek raziskave je bil na sprožilnih faktorjih plazu ter pomenu padavin in potresa za samo sprožitev.



Slika 6 • Primerjava dejanskih dimenzij plazu z rezultati simulacije z modelom LS-Rapid (Sassa, 2010).

Glede na dejstvo, da je bil model LS-Rapid razvit na Japonskem, je povsem pričakovano, da je tudi uporaba le-tega omejena pretežno na Japonsko in z njo povezanimi državami, med katerimi je tudi sosednja Hrvaška, kjer je vzpostavljeno tesno sodelovanje na relaciji

Plaz Aratozava, Japonska 2008 ((Setiawan, 2014), (Setiawan, 2016))

Potres 14. junija 2008 je v provinci Mijagi sprožil več kot 4000 zemeljskih plazov. Volumen plazu Aratozava je bil ocenjen na 67.000.000 m³. Analiza z modelom LS-Rapid



Slika 7 • Plaz Aratozava (Setiawan, 2014).



Slika 8 • Plaz Grohovo (Arbanas, 2014).

je pokazala, da samo potres, brez predhodne velike količine padavin, ne bi mogel sprožiti zemeljskega plazu v takem obsegu in da so ključni sprožilni faktor pri sprožitvi odigrali pomni tlaki v zemljini.

Plaz Grohovo, Hrvaška (Arbanas, 2014)

V področju flišev v dolini Riječine nad Reko se je decembra 1996 sprožil plaz Grohovo. Prostornina plazju je ocenjena na 3 milijone m³, predstavlja pa veliko grožnjo za zaježitev Riječine. Drсна ploskev se je formirala na stiku gruča in flišne osnove. Izvedena simulacija proženja plazju je pokazala, da je bil glavni sprožilni faktor plazju naraščanje pomnih tlakov zaradi dolgotrajnega deževja. Pomemben zaključek raziskave je bil, da lahko ob ponovitvi podobnega padavinskega dogodka pride tudi do proženja plazov na bližnjih območjih, ki so podobne geološke sestave kot plaz Grohovo.

Plazovi v flišu, hrvaška Istra (Dugonjić Jovančević, 2013)

V delu Istre med Pazinom in Buzetom je območje fliša sive barve, zato se ta del imenuje kar Siva Istra. V preteklosti so se na tem delu že prožili plazovi in LS-Rapid je bil uporabljen za analizo teh plazov in oceno nevarnosti pojavljanja novih plazov v prihodnosti. Glavni sprožilni faktor plazov na tem območju predstavljajo intenzivne padavine in infiltracija le-teh. Rezultati modela so pokazali določeno ujemanje s plazovi, ki so se na tem območju dejansko pojavljali v preteklosti.

V prikazanih primerih uporabe modela LS-Rapid je razvidno, da je model primeren za simuliranje proženja plazov. Vsi prikazani primeri prikazujejo uporabo modela za poanalizo dogodkov v smislu boljšega razumevanja dogodka, le v zadnjem primeru gre za omenjanje

možnosti uporabe modela za ocenjevanje dovzetnosti za pojavljanje plazov na izbranem območju. Z veliko količino vhodnih parametrov je model zelo kompleksno zastavljen in terja veliko geotehničnega znanja in izkušenj, predvsem za določanje parametrov zemljin, ki se jih ne da izmeriti in natančno določiti v laboratoriju.

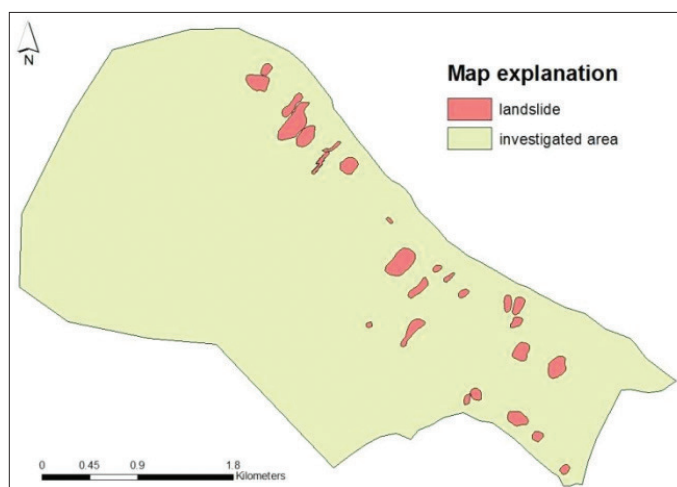
Ravno določanje parametrov zemljin za potrebe lokacijskega napovedovanja proženja plazov in morebitno ocenjevanje volumna proženja je zelo zahtevna naloga, ker pogosto

nimamo vzorcev materiala, še posebej če obravnavamo večje območje.

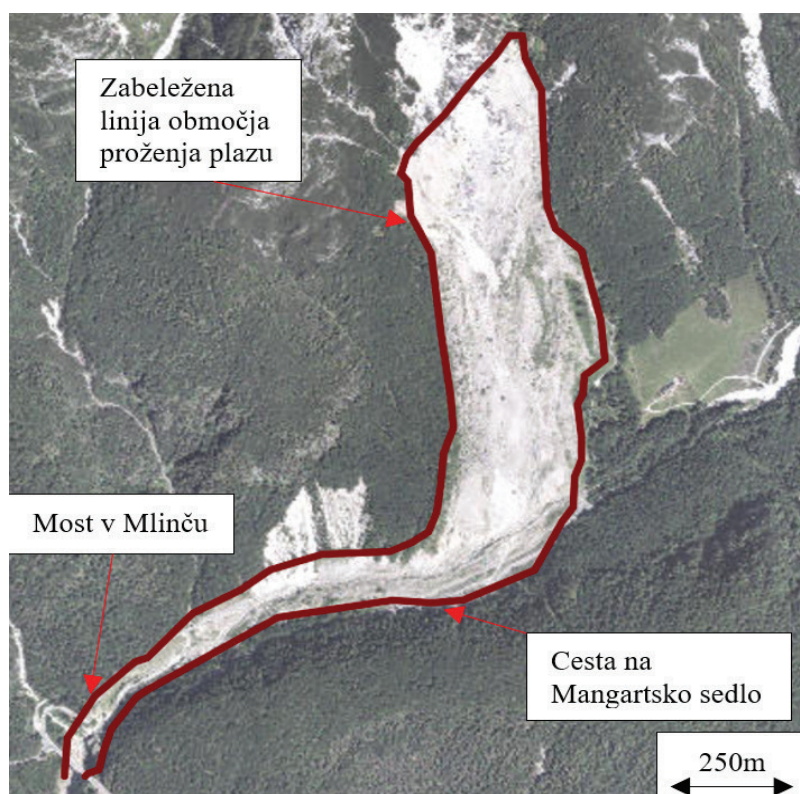
Prikazani primeri kažejo na uporabnost modela za analizo proženja plazov tako zaradi padavin kot potresov. Analizirani so bili tako plitvi kot globoki plazovi, kar daje modelu večjo uporabnost.

3.3 Uporabljeni podatki v naši raziskavi

Za podatke o terenu (DMR) je bila uporabljena kombinacija novih LiDAR-podatkov (javni DMR1) in starih podatkov ((Četina, 2006),



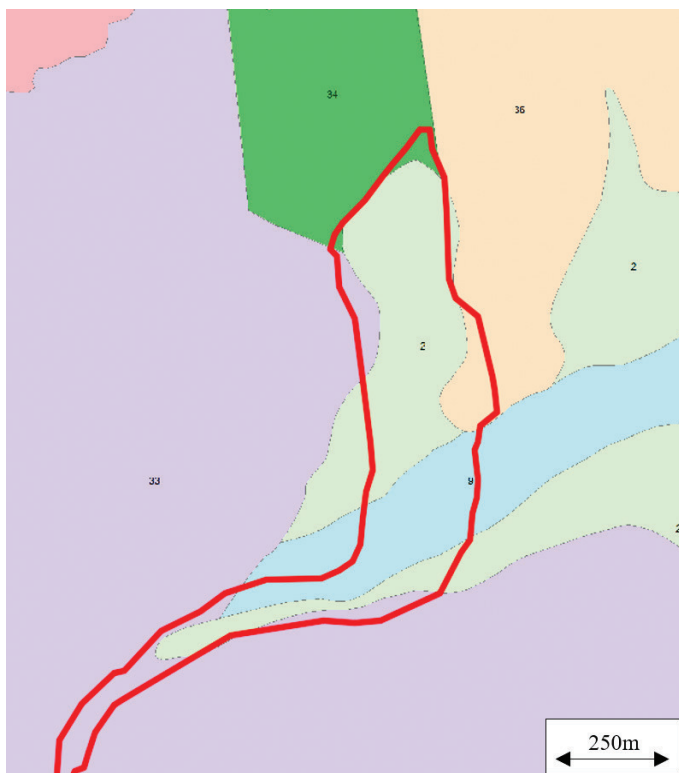
Slika 9 • Karta aktivnih zemeljskih plazov na obravnavanem območju (Dugonjić Jovančević, 2013).



Slika 10 • Digitalni ortofoto in zabeleženo območje plazju Stože – rdeča linija.

(Hojnik, 2001)), kjer je bilo zajeto stanje pred plazom (generirane plastnice iz starih topografskih kart). Za območje zunaj plazu smo uporabili novi LiDAR-ski DMR1 z resolucijo 1 m, za območje plazu pa DMR, generiran iz plastnic terena pred plazom leta 2000. Obdelava in kombiniranje podatkov sta bila izvedena v ACad Civil 3D-orodju.

Geološka karta območja v merilu 1 : 100.000 je bila za potrebe raziskave pridobljena na Geološkem zavodu Slovenije (slika 11) in je bila uporabljena za določanje vhodnih podatkov modela LS-Rapid.



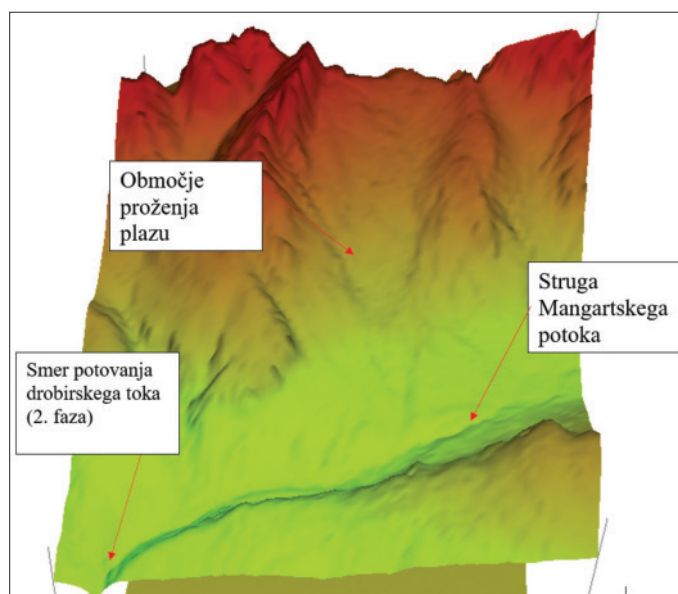
Slika 11 • Geološka karta območja z vrisanim območjem plazu Stože (pridobljeno na GeoZS) – 33 – skladovit glavni dolomit (karnij – norij); 34 – apnenec, lapor, dolomit in dolomit z rožencem (tamarska formacija – (zgornji del karnija); 36 – masiven in skladnat dolomit in apnenec (karnij); 2 – pobočni grušč; 9 – nesprijeta morena.

Pogled na meje plazu in geološko karto območja jasno pokaže, da je do plazenja prišlo v pobočnih gruščih in nesprijeti moreni. Odstopanja na robovih so lahko utemeljena z merilom geološke karte in natančnosti njene izdelave, ki je merilu primerna. Geološka karta za izbrano območje je bila predelana v matriko za vnos v model LS-Rapid, kjer so bili za vsako geološko enoto predpisani parametri, potrebni za simulacijo. Sami geološki parametri so bili predpostavljeni na podlagi izkušenj s podobnimi zemljinami in pregledom literature na tem področju.

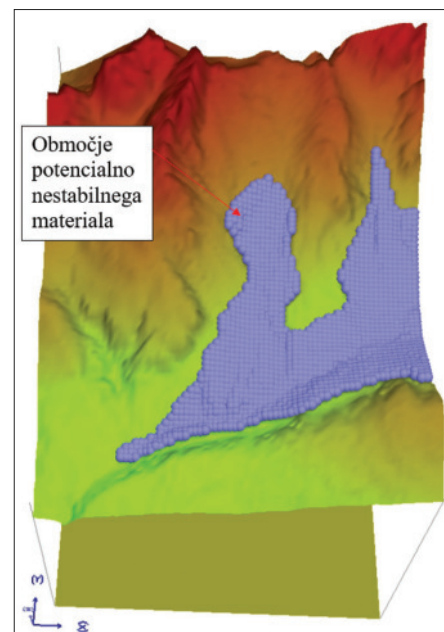
3.4 Modeliranje faze proženja in ocena volumna sproženega materiala

Za določanje območij proženja in ocenjevanje magnitude (plaz Stože, ki predstavlja prvo fazo dogodka na območju Loga pod Mangartom) je bil uporabljen model LS-Rapid, ki je podrobneje opisan v poglavju 3.2. Na uporabo modela LS-Rapid za ocenjevanje magnitude drobirskih tokov je vezana celotna raziskava. Potrditev uporabnosti modela za ta namen in seveda uporabnost modela z uporabo čim lažje dostopnih in predvsem javnih podatkov bi pomenila možnost širše upora-

debeline preperine z območij brez preperine na območja z debelino preperine, različno od 0 m. Glede na geološko karto in karto naklonov, ki je bila izdelana na podlagi analize DMR, je bilo določeno, da imajo apneneci in dolomiti minimalno debelino preperine oz. zaradi velikih naklonov v naravi predstavljajo gola območja. Zato je bilo odločeno, da se debelina preperine za potrebe modeliranja na teh geoloških enotah določi na 0 m. Debelina preperine se je torej določala samo za geološki enoti pobočnih gruščev in nesprijete morene.



Slika 12 • Topografija modela območja plazu Stože – model LS-Rapid.



Slika 13 • Računsko območje s prikazanimi območji nestabilnega materiala (grušči in morena).

bnosti modela za ta namen. S tem pa tudi možnost aplikacije za ocenjevanje magnitude potencialnih drobirskih tokov v procesu ocenjevanja nevarnosti na hudourniških vršajih. V naših simulacijah so bili kot sprožilni faktor upoštevani porni tlaki.

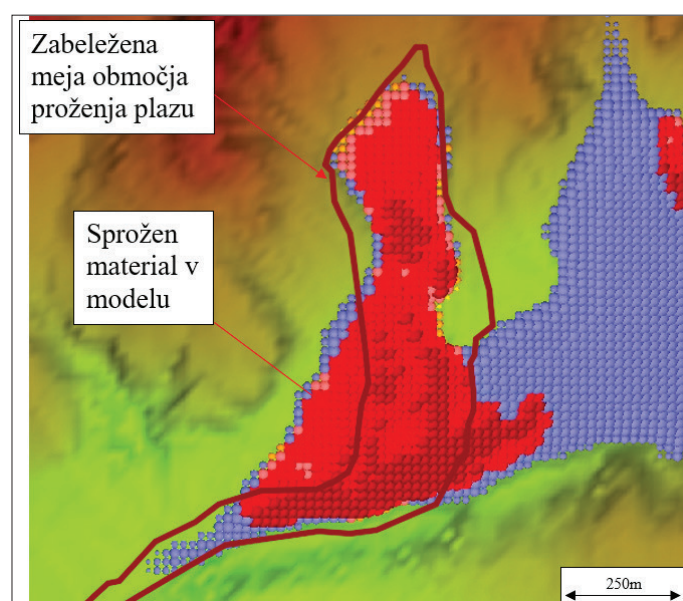
Zaradi zamudnosti vnosa parametrov zemljin preko matrike v model z več geološkimi enotami smo razvili dodaten vmesnik, s katerim je možen enostavnejši vnos parametrov in omogoča še nekatere dodatne funkcije, med katerimi je pomembna t. i. funkcija zaglajevanja, s katero dosežemo enakomeren prehod

Začetni parametri zemljin za simulacijo so bili izbrani sledeče – pobočni grušč: $K = 0,50$; $\varphi_i = 40^\circ$; $\varphi_m = 40^\circ$; $\tau_{ss} = 200$ kPa; $B_{ss} = 1,0$; $\varphi_p = 42^\circ$; $c_p = 5,0$ kPa; $\gamma = 22$ kN/m³ – nesprijeta morena:

$K = 0,50$; $\varphi_i = 36^\circ$; $\varphi_m = 36^\circ$; $\tau_{ss} = 200$ kPa; $B_{ss} = 1,0$; $\varphi_p = 37^\circ$; $c_p = 25,0$ kPa; $\gamma = 23$ kN/m³.

Zaradi že omenjene zahtevnosti določanja parametra τ_{ss} , je bila na podlagi analize delovanja modela postavljena predpostavka, da ima parameter τ_{ss} lahko vrednosti med 45 % in 65 % maksimalne strižne trdnosti materiala.

$\tau_{ss} \approx$ od $0,45\tau_p(r_u = 0)$ do $0,65\tau_p(r_u = 0)$ (2)



Slika 14 • Rezultat modeliranja z vrisanim zabeleženim robom plazu Stože novembra 2000.

Na sliki 14, kjer je prikazan izsek rezultata zgornjega dela plazu, se vidi dobro ujemanje rezultatov modela in zunanjega obsega plazu, zabeleženega po sprožitvi leta 2000. Poleg že omenjenega proženja na območju zunaj zabeleženega obsega plazu v zgornjem delu je določena odstopanja opaziti tudi v osrednjem delu plazu. Tukaj je širina proženja v rezultatih modela precej širša od zabeleženega obsega plazu. Ena možnost je, da je to območje sicer nevarno za sprožitev, vendar v dogodku leta 2000 do proženja ni prišlo, lahko pa se razlog za odstopanje rezultatov od zabeleženega obsega skriva tudi v natančnosti geološke karte, ki je bila osnova za izdelavo modela proženja in je bila izdelana v merilu 1 : 100.000. Sicer je rezultat modela dober, tudi premiki plazu so primerljivi z zabeleženimi, saj pride do plazenja in odlaganja materiala v strugo Mangartskega potoka.

3.5 Interpretacija rezultatov modeliranja in ocena prostornine plazu

Rezultati modeliranja so izkazali dobro ujemanje z dejansko zabeleženimi parametri plazu na terenu neposredno po dogodku. V nadaljevanju je podana ocena prostornine plazu Stože na podlagi rezultatov modela, na kratko pa so povzete še druge primerjave rezultatov simulacije in dejansko zabeleženih razmer na terenu.

Ocene količine sproženega materiala na plazu Stože so bile podane večkrat ((Majes, 2006), (Četina, 2006)), se pa vse ocene gibljejo v smeri 1,2 milijona m³, kar smo privzeli tudi v lastni raziskavi (Sodnik, 2017).

Pri spreminjanju parametrov modelov smo spremljali tudi območje proženja, ki se s spreminjanjem τ_{ss} ni spreminjalo, ampak se je zaradi lastnosti zemljine po porušitvi spreminjalo samo globina drsenja in s tem skupna količina splazelega materiala, ki je prikazana v zadnjem stolpcu zgornje tabele. Medtem ko se je pri spreminjanju r_u , predvsem pri vrednosti $r_u = 0,4$, območje plazenja močno spremenilo in je prišlo do obsežnega proženja tudi zunaj območja plazu Stože.

Najboljše ujemanje izračunane količine sproženega materiala in količine, ocenjene v literaturi, smo dosegli pri modelu s parametroma $r_u = 0,3$ in $\tau_{ss} = 190$ kPa. Omenjeni rezultat

Ime modela	r_u (-)	τ_{ss} (kPa)	Količina materiala (m ³)
Log39	0,3	150	2.460.000
Log20	0,3	200	775.000
Log40	0,3	250	72.000
Log41	0,4	150	2.470.000
Log37	0,4	200	825.000
Log42	0,4	250	105.000
Log43	0,2	150	2.480.000
Log44	0,2	200	735.000
Log45	0,2	250	51.000
Log38	0,35	200	800.000
Log34	0,3	180	1.547.000
Log35	0,3	190	1.195.000
Log36	0,3	195	990.000

Preglednica 1 • Primerjava količine sproženega materiala pri različnih modelih

Model LS-Rapid nima možnosti neposrednega odčitavanja količine splazelega materiala, so pa rezultati modeliranja za vsak časovni korak na voljo v matrični obliki in je iz teh podatkov možen izračun količin. Izpis deluje na način, da za vsak časovni krak poda debeline nestabilnega materiala, in najenostavnejši način je uporaba teh matrik v programu Excel, kamor smo uvozili začetne debeline (vhodni podatek modela) in končne debeline materiala (rezultat modela), kjer je možno videti debeline materiala na koncu simulacije.

Glede na to, da na količino splazelega materiala vplivata parametra r_u in τ_{ss} , je bilo izdelanih več modelov, s katerimi smo analizirali vpliv obeh parametrov na količino splazelega materiala. Vse druge karakteristike modelov so ostale povsem enake, spreminjali smo samo parametra r_u in τ_{ss} . Uporabljene kombinacije modelov so podane v preglednici 1.

analize in izračuna prostornine plazu potrdi tudi našo predpostavko o vrednosti parametra τ_{ss} (enačba 2), po kateri za naš material vrednost τ_{ss} znaša:

$$\tau_p = c_p + \sigma'_{zz} \tan \varphi_p \quad (3)$$

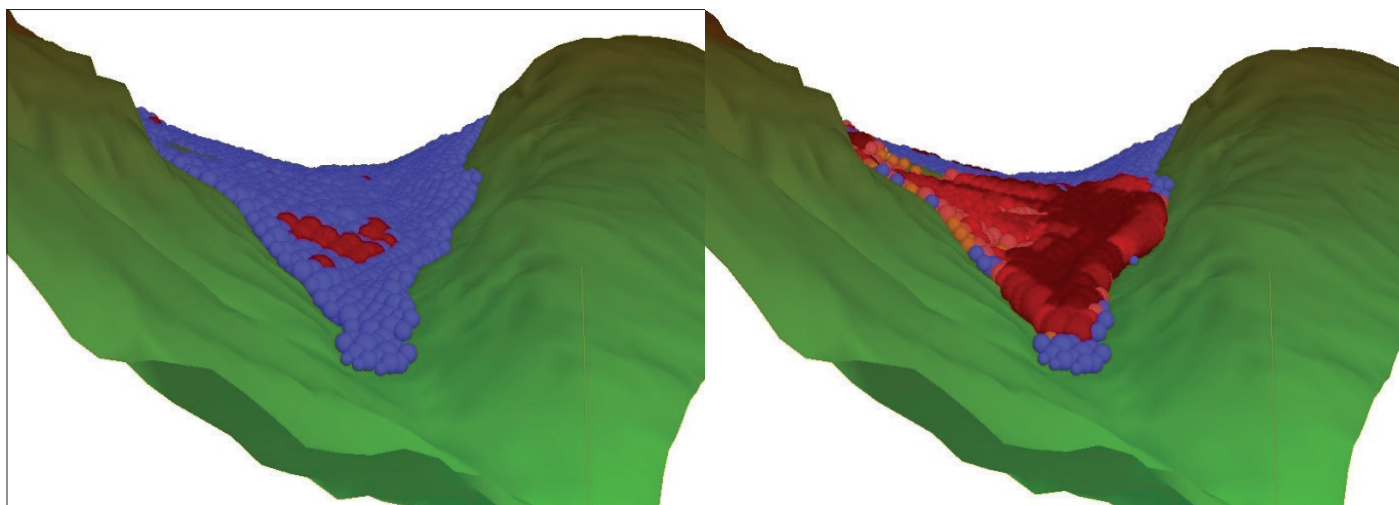
$$\sigma'_{zz} = \sigma_{zz} \times (1 - r_u) \quad (3)$$

$$\tau_p = 5 \text{ kPa} + \left(30 \text{ m} \times 22 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \times (1 - 0,3) \right) \times \tan 42^\circ \quad (5)$$

$$\tau_p = 421 \text{ kPa} \quad (6)$$

$$\tau_{ss} = 189 \text{ kPa do } 273 \text{ kPa} \quad (7)$$

Zgornji izračun pokaže, da je umerjena vrednost parametra τ_{ss} na spodnji meji postavljene ocene, pa vendar znotraj predlaganega okvirja vrednosti, kjer smo postavili oceno τ_{ss} v odvisnosti od τ_p za primere, ko nimamo na voljo meritev tega parametra. Za plaz Stože torej lahko zaključimo, da



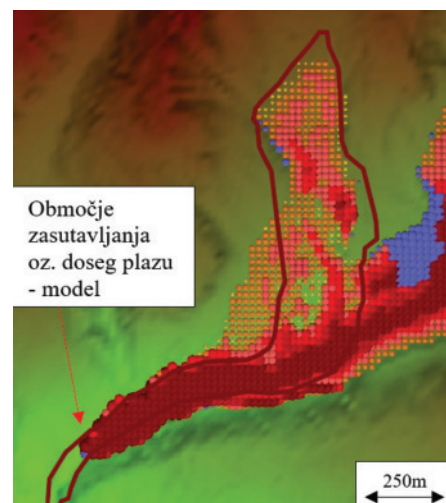
Slika 15 • Rezultat modeliranja prve faze plazu Stože – leva brežina Mangartskega potoka. Začetno stanje (levo) in končno stanje, po prehodu plazu, ki je zaradi velike hitrosti gibanja zasul levo brežino visoko nad dolinskim dnom Mangartskega potoka (desno).

najbolje opiše dogodek novembra 2000 model s parametri $r_u = 0,3$ in $\tau_{ss} = 190$ kPa, s katerimi dosežemo primerljivo območje proženja in primerljivo količino sproženega materiala.

Poleg ujemanja obsega plazu z rezultati simulacije in izračuna prostornine plazu smo razmere na terenu primerjali s simuliranimi še za dva parametra oz. dve značilnosti plazu Stože, in sicer točko ustavljanja plazu v strugi Mangartskega potoka ter razmere na levem bregu struge Mangartskega potoka, kjer je ob zaustavljanju plazu prišlo do nadvišanja plazu.

Slika 15 prikazuje dogajanje med dogodkom in vidi se gibanje drobirskega materiala v strugo in končno nadvišanje drobirskega toka na levem pobočju nad Mangartskim potokom, kar se ujema z zabeleženim stanjem po dogodku 15. novembra 2000. Druga faza plazenja, 17. novembra 2000, na tem območju ni prekrila sledov plazu iz 15. novembra 2000.

Na sliki 16 pa so prikazani rezultat modela plazu Stože in ujemanje rezultatov z vidika točke ustavljanja. Že s slike 14 je razvidno, da se material plazu ustavlja višje gorvodno, kot se je to zgodilo ob proženju novembra 2000. Zato smo v modelu znižali vrednost parametra τ_{ss} na 125 kPa, kjer pa je bilo ujemanje točke ustavljanja dobro. Hkrati tako nizka vrednost parametra τ_{ss} povzroči, da je območje proženja precej večje od zabeleženega po dogodku novembra 2000. Taka ugotovitev lahko po eni strani pomeni, da so se med plazenjem deloma spremenile značilnosti materiala (v strugi Mangartskega potoka je zaradi dotoka vode prišlo do dodatne namočenosti odloženega materiala in s tem do zmanjšanja strižne trdnosti drobirske mešanice), po drugi strani pa se je treba zavedati dejstva, da je model LS-Rapid v prvi vrsti model proženja zemeljskih plazov in manj model gibanja masnih tokov (npr. viskoznost drobirske mešanice pri gibanju ni upoštevana).



Slika 16 • Rezultat modeliranja gibanja prve faze plazu Stože in prikaz točke ustavljanja materiala v strugi Mangartskega potoka.

4 • SKLEP

Ocenjevanje nevarnosti zaradi naravnih pojavov in uporaba teh ocen nevarnosti pri ocenjevanju ogroženosti je na nekaterih območjih, na primer poplavnih, v zadnjih letih postala ustaljena inženirska praksa tudi v Sloveniji. Ker drobirski tokovi glede na izkušnje zadnjih dveh desetletij tudi v Sloveniji predstavljajo vedno bolj prepoznano tveganje, bi bilo nujno tudi za ta nevarni

naravni pojav določiti ustrezno metodologijo, ki bi bila podlaga za izdelavo ocen nevarnosti ter pozneje ocen ogroženosti zaradi drobirskih tokov. Ocene nevarnosti in ocene ogroženosti se morajo upoštevati v postopkih prostorskega načrtovanja in umeščanja posegov v prostor. Pri poplavih velja, da se s hidrološko analizo določijo projektni preteke z različnimi povratnimi dobami,

ki se uporabijo za ocenjevanje nevarnosti in za načrtovanje omilitvenih ukrepov. Pri drobirskih tokovih magnituda dogodka ni odvisna samo od padavin, ampak predvsem od topografije terena, geološke sestave tal, ki lahko privede do plazenja tal in s tem velike količine zemljinkega materiala, ki je vir za nastanek drobirskega toka – in ravno magnituda potencialnega drobirskega toka je ključni podatek za ocenjevanje nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov.

Za ocenjevanje magnitude potencialnih drobirskih tokov je bila predlagana uporaba

modela proženja LS-Rapid. Za vhodni podatek smo uporabili javno dostopne topografske podatke DMR1 in geološko karto Slovenije v merilu 1 : 100.000. Za določanje prostornine zemeljskega plazju in s tem magnitude potencialnega drobirskega toka smo model proženja uporabili tudi za analizo plazju Stože, kjer so zaradi opravljenih raziskav na voljo dobri podatki za kontrolo rezultatov modela. Sprožilni faktor v vseh modelih proženja so bili porni tlaki v zemljini, kar bi v nadaljevanju lahko nadgradili v povezavo s hidrološkim modelom in določanjem praga kritičnih padavin (ang. *threshold*). Z modeliranjem zemeljskega plazju se

je izkazalo, da je možno dobro simulirati tako proženje kot odlaganje plazju ter da lahko z dodatnimi analizami izračunamo tudi prostornino plazju. Ker določanje parametrov potencialnega zemeljskega plazju ni možno oz. lahko podamo samo oceno, smo v raziskavi predlagali mejne vrednosti ključnih parametrov, znotraj katerih se lahko giblje njihova dejanska vrednost. Na tem mestu je treba poudariti, da je ključna razlika pri določanju scenarija med poplavami in drobirskimi tokovi ta, da se pri drobirskih tokovih ocenjena magnituda ne določi v smislu točne vrednosti, ampak se lahko določi le zgornja in spodnja mejna vrednost mag-

nitude. Zelo pomembno bi bilo tudi, da bi za obravnavana hudourniška območja obstajale bolj natančne geološke karte (merilo 1 : 10.000 ali morda vsaj 1 : 25.000), katerih del bi bila tudi ocena debeline erozijskega materiala posamezne geološke enote na geološki karti.

Ključno pri ocenjevanju nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov je zavedanje, da karte nevarnosti oz. meje med razredi nevarnosti ne morejo biti prikazane kot linije, ampak morajo zaradi kompleksnosti pojava in določanja nekaterih parametrov biti te meje prehodne (zvezen prehod med razredi nevarnosti).

5 • ZAHVALA

V prispevku je podan povzetek dela raziskave, ki je bila opravljena v okviru izdelave doktorske disertacije s področja ocenjevanja nevarnosti zaradi delovanja drobirskih to-

kov na hudourniških vršajih (Sodnik, 2017). Zahvala dr. Mateju Mačku za sodelovanje pri geotehničnem delu raziskave, prof. dr. Matjažu Četini za posredovanje digitaliziranega

obrisa plazju Stože, zabeleženega po dogodku novembra 2000, in Geološkemu zavodu Slovenije za geološko karto obravnavanega območja. Doktorska disertacija je potekala v okviru dela raziskovalnega programa P2-0180 Vodarstvo in geotehnika, ki ga je financirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS).

6 • LITERATURA

- Arbanas, Ž., Mihalič Arbanas, S., Vivoda, M., Peranić, J., Dugonjić Jovančević, S., Jagodnik, V., Identification, monitoring and simulation of landslides in the Riječina River Valley, Croatia, Proceedings of the SATREPS Workshop on Landslides in Vietnam, 2014.
- Baron, I., Supper, R., Winkler, E., Motschka, K., Ahl, A., Čarman, M., Kumelj, Š., Airborne geophysical survey of the catastrophic landslide at Stože, Log pod Mangrtom, as a test of an innovative approach for landslide mapping in steep alpine terrains, Natural Hazards and Earth System Sciences 13, 2543–2550, 2013.
- Cruden, D. M., Varnes, D. J., Landslide types and processes, v: Turner, A. K., Schuster, R. L. (ur.), Landslides investigation and mitigation, Transportation Research Board Special Report 247, Chapter 3, US National Research Council, Washington, DC: 36–75, 1996.
- Četina, M., Rajar, R., Hojnik, T., Zakrajšek, M., Krzyk, M., Mikoš, M., Case Study: Numerical Simulations of Debris flow below Stože, Slovenia, Journal of Hydraulic Engineering 132(2), 121–130, 2006.
- Dugonjić Jovančević, S., Nagai, O., Sassa, K., Arbanas, Ž., Deterministic Landslide Susceptibility Analyses Using LS-Rapid Software, Proceedings of the 1st Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region, Zagreb, 2013.
- Đurović, B., Mikoš, M., Ali smo ogroženi kadar tvegamo? – pojmi in izrazje teorije tveganj zaradi naravnih nevarnosti, Geologija 49(1), 151–161, Ljubljana 2006.
- Fazarinc, R., Matematično modeliranje drobirskega toka v Logu pod Mangartom, magistrsko delo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer, 2002.
- Hojnik, T., Četina, M., Krzyk, M., Rajar, R., 2D model drobirskega toka na območju Zgornjega in Spodnjega Loga, Zbornik Mišičev vodarski dan 2001, Maribor, 84–91, 2001.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L., The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides 11, 167–194, 2014.
- Jakob, M., Hungr, O., Debris-flow hazards and Related Phenomena, Chapter 17, Springer praxis books, 411–443, 2005.
- Majes, B., Sanacija velikih plazov v Sloveniji, v: Nardin, G. (ur.). G.E.O.O.N. - Gozdovi Ekološko-Okoljska Obnova Narave, smernice za omejevanje hidrogeološkega tveganja, Interreg III A 2000 - 2006 Italia - Slovenia, progetto F.R.A.N.E., Trst, Avtonomna dežela Furlanija Julijska krajina, Glavna Direkcija za kmetijske, naravne, gozdne vire in gorske predele, Služba za gorski prostor in vzdrževanje, 105-130, 2006.
- Mikoš, M., Izrazje na področju erozijskih pojavov, Gradbeni vestnik 49, 101–128, 2000.
- Mikoš, M., Značilnosti drobirskih tokov, Ujma 14-15, 295–299, 2001.

- Mikoš, M., Upravljanje tveganj in nova Evropska direktiva o poplavnih tveganjih, *Gradbeni vestnik* 56(11), 278–285, 2007.
- Mikoš, M., Četina, M., Brilly, M., Hydrologic conditions responsible for triggering the Stože landslide, Slovenia, *Engineering Geology* 73, 193–213, 2004.
- Mikoš, M., Fazarinc, R., Majes, B., Rajar, R., Žagar, D., Krzyk, M., Hojnik, T., Četina, M., Numerical simulation of debris flows triggered from the Strug rock fall source area, W Slovenia, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6, 261–270, 2006.
- Pavšek, M., Snežni plazovi v Sloveniji: geografske značilnosti in preventiva, *Geografija Slovenije* 6, Ljubljana, Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU, 209 str., 2002.
- Petkovšek, A., Pomen geotehničnih raziskav pri preučevanju drobirskih tokov in prve slovenske izkušnje, *Gradbeni vestnik* 51, 346–361, 2002.
- Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti, UL RS št.60, 2007, 8375–8379, 2007.
- Ribičič, M., Značilnosti drobirskega toka Stože pod Mangartom, *Ujma* 14–15, 102–108, 2001.
- Sassa, K., Nagai, O., Solidum, R., Yamazaki, Y., Ohta, H., An integrated model simulating the initiation and motion of earthquake and rain induced rapid landslides and its application to the 2006 Leyte landslide, *Landslides* 7(2), 219–236, 2010.
- Setiawan, H., Sassa, K., Takara, K., Miyagi, T., Fukuoka, H., He, B., The simulation of a deep Large-Scale Landslide Near Aratozawa Dam Using a 3.0. Mpa Undrained Dynamic Loading Ring Shear Apparatus, 3rd World Landslide Forum, Beijing, China, 2014.
- Setiawan, H., Tkara, K., Sassa, K., Simulation of Aratozawa landslide using Ring Shear Tests and LS-Rapid model, Japan Geoscience Union Meeting, 2016
- Skaberne, D., Predlog slovenskega izrazoslovja pobočnih premikanj – pobočnega transporta. *Geologija* 44(1), 89–100, 2001.
- Sodnik, J., Metode za ocenjevanje ogroženosti z drobirskimi tokovi, diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer, 2005.
- Sodnik, J., Drobirski tok nad Kropo, *Slovenski vodar* 18, 53–55, 2007.
- Sodnik, J., Matematično modeliranje drobirskih tokov in priprava podrobnih kart nevarnosti, magistrsko delo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Hidrotehnična smer, 2009.
- Sodnik, J., Ocenjevanje nevarnosti zaradi delovanja drobirskih tokov na hudourniških vršajih, doktorska disertacija, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2017.
- Uredba o pogojih in omejitvah za izvajanje dejavnosti in posegov v prostor na območjih, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, UL RS št.89, 2008, 12205-12207, 2008.
- Varnes, D. J., Slope movement types and processes, v: Schuster, R. L., Krizek, R. J. (ur.) *Landslides, analysis and control*. Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington, DC: 11–33, 1978.
- Zakon o vodah (ZV-1), UL RS št. 67, 2002.