GEOLOGIJA 52/1, 87-104, Ljubljana 2009
https://doi.org/10.5474/geologija.2009.010

Model dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji v merilu 1 : 250.000

Debris-flow susceptibility model of Slovenia at scale 1 : 250,000

Marko KOMAC[1], Špela KUMELJ[1] & Mihael RIBIČIČ[2]

[1]Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ul. 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija; e-mail: marko.komac@geo-zs.si; spela.kumelj@geo-zs.si
[2]Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Privoz 11, SI-1000 Ljubljana, Slovenja; e-mail: mihael.ribicic@ntf.uni-lj.si

Prejeto / Received 28. 4. 2009; Sprejeto / Accepted 15. 5. 2009

Ključne besede: drobirski tokovi, dovzetnost za pojavljanje, vplivni faktorji, model, plazovi, GIS, Slovenija
Keywords: debris-flow, susceptibility, influence factors, model, landslides, GIS, Slovenia

Izvleček

Za območje Slovenije, ki meri preko 20.000 km^2, smo izdelali model dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v merilu 1 : 250.000. Za izračun dovzetnosti za pojavljanje tega redkega in zapletenega pobočnega masnega premikanja v GIS-u smo uporabili informacijske sloje, ki opisujejo geologijo (litologija in oddaljenost od prelomnih struktur), intenzivnejše padavine (48-urne padavine), izpeljanke digitalnega modela višin, ki opisujejo geomorfološke značilnosti terena (naklon in ukrivljenost pobočja, energijski potencial povezan z nadmorsko višino), mreže površinskih vodnih tokov (oddaljenost od površinskih tokov, energijski potencial strug) ter lokacije šestnajstih znanih pojavov drobirskih tokov, ki so bile uporabljene za oceno kvalitete modelov dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Z namenom izdelati enostaven in obstojen model, ki bi bil uporaben tudi na drugih območjih, je bila za izdelavo modela izbrana metoda linearne utežene vsote, uporabljeni pa so bili enostavno dostopni prostorsko-časovni dejavniki. Na podlagi izračunov 672-ih linearnih modelov z različnimi kombinacijami uteži uporabljenih prostorsko-časovnih dejavnikov in rezultatov natančnosti njihove napovedi območij, podvrženih pojavom drobirskih tokov, smo izbrali najprimernejšo kombinacijo uteži. Model je namenjen prostorskemu napovedovanju območij nastanka/sprožitve in transportnih območij drobirskih tokov in predstavlja splošni pregled izpostavljenih območij v Sloveniji ter osnovo za nadaljnje podrobnejše raziskave in analize. Pokazal je, da je zelo velika dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov na okoli 4% površine ozemlja Slovenije in velika na okoli 11% površine. Po pričakovanju ta območja večinoma pripadajo alpskemu in goratemu svetu NW in N Slovenije.

Abstract

For the area of Slovenia (20.000 sqr. km) a debris-flow susceptibility model at scale 1 : 250,000 was produced. To calculate the susceptibility to debris-flow occurence using GIS several information layers were used such as geology (lithology and distance from structural elements), intensive rainfall (48-hour rainfall intensity), derivates of digital elevation model (slope, curvature, energy potential related to elevation), hydraulic network (distance to surface waters, energy potential of streams), and locations of sixteen known debris flows, which were used for the debris-flow susceptibility models' evaluation. A linear model weighted sum approach was selected on the basis of easily acquired spatio-temporal factors to simplify the approach and to make the approach easily transferable to other regions. Based on the calculations of 672 linear models with different weight combinations for used spatio-temporal factors and based on results of their success to predict debris-flow susceptible areas, the best factors' weight combination was selected. To avoid overfitting of the prediction model, an average of weights from the first hundred models was chosen as an ideal combination of factor weights. For this model also error interval was calculated. A debris-flow susceptibility model at scale 1 : 250,000 represents a basis for spatial prediction of the debris-flow triggering and transport areas. It also gives a general overview of susceptible areas in Slovenia and gives guidance for more detailed research areas and further spatial and numerical analyses. The results showed that approximatelly 4 % of Slovenia's area are extremely high susceptible and approximatelly 11 % of Slovenia's area of susceptiblity to debris-flows is high. As expected these areas are related to mountainous terrain in the NW and N of Slovenia.

Uvod

Drobirski procesi so vzrok številnim naravnim nesrečam in z njimi povezanimi družbeno-ekonomskimi problemi v gorskih predelih po vsem svetu (Nakagawa et al., 2000, 2001). Takahashi (1991) navaja, da so drobirski tokovi na Japonskem v obdobju med letoma 1967 in 1987 zahtevali najmanj 1250 življenj, v Avstriji pa so po Embleton-Hamanu (1997) hudourniške poplave in hudourniški izbruhi skupaj z drobirskimi tokovi zahtevali v obdobju med letoma 1971 in 1991 46 življenj. Oldnall (2004) navaja, da je samo v petih največjih naravnih nesrečah v dvajsetem stoletju, v katerih so drobirski tokovi igrali najpomembnejšo vlogo, življenje izgubilo okoli 220.000 ljudi, ekonomska škoda za le enega od teh dogodkov pa je ocenjena na 8,5 milijard evrov. V Sloveniji so drobirski tokovi redek pojav, toda v letu 2000 se je v Logu pod Mangrtom sprožil velik drobirski tok, kjer je življenje izgubilo 7 ljudi (Mikoš, 2001). Ta pojav je mogoče razumeti kot sprožilni vzrok, da je treba drobirske tokove, kot redke, toda izjemno nevarne pojave, sistematično proučevati. Eden izmed rezultatov teh raziskav je tudi pričujoč Zemljevid dovzetnosti (tudi podvrženost) za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji v merilu 1 : 250.000.

Drobirski tokovi so procesi pobočnega masnega premikanja velikih hitrosti, ki se v večini primerov pojavljajo v plitvih, grobozrnatih zemljinah na strmih pobočjih. Sprožitelj je prekomerno povečanje vsebnosti vode v zemeljski masi, ki je običajno posledica močnega deževja (Fleming et al., 1989; Mainali & Rajaratnam, 1994; Anderson, 1995; Cruden & Varnes, 1996; Dai et al., 1999; Fiorillo & Wilson, 2004; Lan et al., 2004; Wen & Aydin, 2005), čeprav je količino padavin, pri katerih se sprožijo drobirski tokovi, zaradi zelo spreminjajočih se hidrogeoloških pogojev v goratih predelih, težko natančneje določiti (Bardou & Delaloye, 2004). Sprožilni dejavnik drobirskih tokov je lahko tudi hitro taljenja snega (Rickenmann & Zimmerman, 1993; Carson, 2002; Bardou et al., 2003), ki pa ni nujno povezano s pojavom obilnih padavin. Zaradi svoje hitrosti predstavljajo drobirski tokovi veliko nevarnost za prebivalstvo in lastnino, njihova gostota pa omogoča premikanje večjih blokov kamenja, drevja in večjih predmetov, tudi avtomobilov (Cruden & Varnes, 1996). Takahashi (2007) pripisuje izvor materiala za nastanek drobirskih tokov dvema procesoma, eroziji ali zemeljskim plazovom.

Ribičič (2002) razlaga, da je drobirski tok kompleksen pojav, ki sloni na značilnih in poznanih mehanizmih nastanka, proženja, transporta in končnega razlitja viskozne mase iz kamninskih in vodnih delcev. Za nastanek drobirskega toka morajo biti na mestu žarišča podane specifične morfološke, geološke in hidrološke razmere, ki pogojujejo, da se ob ekstremnih padavinah večja količina nesprijetega ali slabo sprijetega kamninskega materiala saturira z vodo do te mere, da preide iz trdne v tekočo fazo. Da pride do proženja drobirskega toka, mora kamninska masa vsebovati tako grob kamninski material (drobir), kot tudi drobne frakcije, med katerimi pa ne sme prevladovati glinasta frakcija, saj bi v tem primeru lahko prišlo do počasnega blatnega pobočnega toka. Tekoča masa po običajno strmo nagnjenem pobočju zdrsne v hudourniško strugo, po kateri lahko kot drobirski tok potuje več kilometrov daleč, če konveksnost in nagib terena to omogočata. Gibanje drobirskega toka ohranjajo kinetična energija premikajoče se mase in trki med kosi drobirja v toku. Čelo toka ob napredovanju vključuje material iz struge, drevesa in ves material, ki je na poti toka. Na ta način se drobirski tok »hrani« in postaja po količini zajetega materiala vedno večji. Ko se nagib vodotoka zmanjša ali močno razširi, se drobirski tok lahko ustavi. Največkrat pa se drobirski tok konča v dolini, kjer se razlije kot vršaj. Drobirski tok je torej gravitacijski (hiperkoncentriran) tok mešanice zemljin, hribin, skal, vode in/ali zraka, ki se ob izjemnih padavinah (redko tudi ob potresu, vulkanu), »utekočini«.

Po Skabernetu (2001) je drobirski tok plastični tok zmesi kohezivnega, pogosto slabo sortiranega materiala in vode s spremenljivo porazdelitvijo velikosti zrn, koncentracijo, hitrostjo in dinamiko. Drobirski tokovi nastajajo v sedimentacijskih okoljih (kopenskih in podvodnih) in se običajno razvijejo iz plazenja. Na kopnem nastanejo drobirski tokovi v vseh klimatskih pogojih, običajno pa jih povzroči hitro povečanje porne vode v materialu ali zaradi močnega deževja ali pa zaradi hitrega taljenja snega. Redkejša vzroka za nastanek drobirskega toka sta lahko tudi potresna in vulkanska dejavnost. Skaberne (2001) tudi predlaga, da je izraz »drobirski tok« vezan na reološke lastnosti toka, zato predlaga, da se v izogib nesporazumom pred izrazom uporablja predpona, s katero so natančneje opredeljene lastnosti prevladujočega materiala v toku. Petkovšek (2001) navaja, da so reološke lastnosti drobirskega toka, ki je v svoji osnovi trifazni tok, funkcija viskoznosti, turbulence ter dinamike med delci – trkov in drsenja.

Mikoš (2001) definira drobirski tok kot hiperkoncentrirani tok mešanice vode in sedimentov, poenostavljeno torej dvofazni tok, ki ga določajo prostorninska gostota, zrnavost sedimenta in hidravlične razmere ter drugi naključni vplivni dejavniki, ki določajo tretjo fazo in jih je z enačbami težko definirati. Gibanje drobirskih tokov sodi v področje dinamike nenewtonskih tekočin, kjer je nujno dobro poznati reološke značilnosti obravnavanega erozijskega drobirja. Glede na nastanek in razvoj je možno drobirski tok podobno kot večino erozijskih procesov deliti na tri dele oziroma ga opisati, kakor da bi bil sestavljen iz treh procesov: proženja, gibanja in odlaganja.
Ker je dinamika gibanja in akumulacije drobirskih tokov oziroma njihovega materiala zapletena, z vidika matematičnega in prostorskega modeliranja pa predstavlja velik izziv, je pristopov k modeliranju drobirskih tokov kar nekaj. Christensen in sodelavci (2009) so razvili kompleksen matematični model simulacije različnih

pobočnih masnih premikanj za GIS. Pozzoni in sodelavci (2009) ter Zhou in sodelavci (2003) so k modeliranju dinamike drobirskih tokov pristopili z metodo Monte Carlo. Podjetje R2 Resource Consultants je za Oregonski oddelek za gozdove (Oregon Department of Forestry) izdelalo analizo ogroženosti gozdov zaradi drobirskih tokov in plazov (2005), v kateri so izbrali izkustveni pristop. Kowalski in McElwaine (2008) sta za območje Illgrabna v Švici modelirala dinamiko drobirskega toka po načelu dvofaznega toka, podobno pa so se problematike na Japonskem lotili Wang in sodelavci (2006). Za območje Hobarta je Mazengarb (2004) na podlagi analize pojavljanja in ob pomoči metode, ki sta jo razvila Dietrich in Montgomery (1998), izdelal zemljevid nevarnosti zaradi pojavljanja drobirskih tokov, ki je zaradi natančnosti merila 1 : 25.000 že uporabna za prostorsko načrtovanje na lokalnem nivoju. Miller in Burnett (2008) sta uporabila probabilistični pristop za določanje akumulacijskih območij (vršajev) na nivoju struge, model pa je možno uporabiti tudi na nivoju porečja. Z metodo biaviatne analize so Guinau in sodelavci (2007) določili območja z večjo verjetnostjo nastanka drobirskih tokov v zahodni Nikaragvi. Različne pristope k ocenjevanju magnitud drobirskih tokov sta povzela Sodnik in Mikoš (2006). Analize pojavljanja vršajev s pomočjo prostorskih analiz digitalnega modela reliefa sta se na testnem območju Zgornjesavske doline lotila tudi Podobnikar in Székely (2008).

Drobirski tokovi imajo tudi velik vpliv na vodne habitate v strugah, kjer se pojavljajo. Fannin in Rollerson (1993) tako navajata, da je erozijski vpliv drobirskih tokov na strugo odvisen od naklona struge, geomorfologije in relativnega položaja prizadete struge v vodni mreži. Drobirski tokovi lahko v strugah z velikimi relativnimi padci erodirajo strugo do matične kamnine, obenem pa uničijo večino obvodne vegetacije (Swanson et al., 1998).

Slovenija je zaradi pestrosti geološke zgradbe, geodinamike, geografske lege, ki pogojuje regionalno in mikroklimo ter geomorfoloških značilnosti poleg pogostejših procesov pobočnih masnih premikanj izpostavljena tudi pojavom drobirskih tokov. Najbolj znan primer je že omenjeni drobirski tok, ki je novembra 2000 prizadel vas Log pod Mangartom (npr. Mikoš, 2001), a ta še zdaleč ni edini. Budnemu očesu obiskovalca gorskih in hribovitih delov Slovenije ne uidejo številni pojavi vršajev, ki pričajo o pogostosti pojavljanja drobirskih tokov na našem ozemlju v recentnem obdobju z vidika geološkega pojmovanja časa. Številna domača literatura, ki obravnava drobirske tokove, nedvomno priča o aktualnosti pojavov drobirskih tokov na slovenskem ozemlju. Pomen njihovega razumevanja dokazuje tudi s strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost financirani ciljni raziskovalni projekt – CRP M2-0144 »Ocena ogroženosti zaradi delovanja drobirskih tokov«, v okviru katerega so bile opravljene v nadaljevanju predstavljene analize.

Študijsko območje in uporabljeni podatki

Kljub dejstvu, da so sprožitelji drobirskih tokov običajno enkratni dogodki kot so na primer močna deževja, taljenje snega, potresi, človeški posegi v prostor, pa je njihovo prostorsko in količinsko pojavljanje odvisno od več povzročiteljev – dejavnikov kot so litološko-strukturne, hidrografske in geomorfološke značilnosti terena (Lin et al., 2002). Melelli in Taramelli (2004) sta pri svojem modeliranju nevarnosti nastanka drobirskih tokov z uporabo GISa določila štiri dejavnike vpliva, geologijo, naklon pobočij, oddaljenost od prelomov in oddaljenost od površinskih vodnih tokov. Delmonaco in sodelavci (2003) so svoj pristop k oceni nevarnosti nastanka drobirskih tokov na večjem območju (porečje Vezza v Italiji) razdelili na več korakov. Ti temeljijo na laboratorijskih preiskavah materiala, ki so služili kot eden od vhodnih podatkov za GIS modeliranje napovedi v odvisnosti od vplivnih prostorsko-časovnih dejavnikov. Kot vhodne podatke so avtorji uporabili lokacije plazov, debelino podlage, naklon pobočij, litološke značilnosti terena in frekvenco padavin.

Na podlagi literature (Alzate et. al., 1999; Lin et al., 2002; Melelli & Taramelli, 2004; Guinau et al., 2007; Di et al., 2008; Mergili, 2008), izkušenj in strokovne ocene, smo se odločili, da pri modeliranju dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji uporabimo podatke o litološki zgradbi, oddaljenosti od prelomov, naklonu in naklonskem potencialu terena, o padavinah, oblikovanosti (ukrivljenosti) pobočij, energetskem potencialu vodotokov ter o oddaljenosti od površinskih tokov.

Geologija – litologija

Za oceno dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov z vidika litološke zgradbe terena smo kot osnovni podatek privzeli Geološko karto Slovenije v merilu 1 : 250.000 (Buser, v tisku), ki deli slovensko ozemlje na 114 litostratigrafskih členov. Na podlagi strokovne geološke ocene smo vsako od *litostratigrafskih enot* na podlagi njenih mehanskih lastnosti razvrstili v enega od 8 razredov dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Kot dodaten dejavnik vpliva smo upoštevali *prisotnost prelomov in narivov*, ki prispeva k večji možnosti nastanka drobirskih tokov (Poljak, 2000).

Padavine

Padavine so se izkazale kot pomemben sprožilni dejavnik za nastanek drobirskih tokov (npr. Delmonaco et al., 2003; Fiorillo & Wilson, 2004; Lan et al., 2004; Wen & Aydin, 2005), zato je smiselno sklepati, da se le-ti pogosteje in v večjih razsežnostih pojavljajo na tistih območjih v Sloveniji, kjer nastopajo intenzivnejše padavine. Med možnimi podatki o padavinah smo za analizo izbrali podatkovni niz o *48-urnih maksimalnih padavinah s 50-letno povratno dobo* za območje Slovenije (obdobje izvornih podatkov je 1961 – 2000) (ARSO, 2003). Prostorski prikaz niza 48-urnih padavin

pokaže, da so ekstremne padavine močnih intenzitet, vezane na alpska in hribovita območja, kjer prihaja do intenzivnega dviganja vlažnega zraka in drugih učinkov konvekcije zračnih mas, kar povzroča povečanje intenzitete padavin.

Digitalni model višin

Da lahko z vodo prepojen (saturiran) kamninski material, ki je po sestavi ugoden za nastanek drobirskega toka, preide v nenadno gibanje, se mora nahajati na nagnjenem pobočju, kjer se lahko potencialna energija spremeni v kinetično. *Naklon* pobočja območja nastanka/sprožitve vpliva na možnost zdrsov materiala, ki se v nadaljni fazi razvije v drobirski tok.

Morfološka oblikovanost terena (*ukrivljenost*) je pomemben dejavnik, ki vpliva na možnost potovanja drobirskega toka v nižje lege. Na osnovi digitalnega modela višin je mogoče določiti konkavne oblike terena (v danem primeru struge), kot primerne za potovanje drobirskih tokov.

Pojavljanje drobirskih tokov je vezano na visoka skalna pogorja (npr. Rickenmann & Zimmerman, 1993; Mikoš, 2001; Archetti & Lamberti, 2003; Jež et al., 2008; Toyos et al., 2008). Najbolj pogosti in največji nastopajo v območju Himalaje, v Andih in Alpah, pojavljajo pa se tudi v nižjih gorovjih. Podobno velja za Slovenijo, kjer pogostost in obsežnost drobirskih tokov pada z nadmorsko višino. Zaradi navedenega je bil kot eden od dejavnikov vpliva in upoštevan v modelu napovedi, izdelan *naklonski potencial terena glede na višinske pasove*. Ta informacijski sloj predstavlja potencialno energijo materiala drobirskega toka, ki se ob sprožitvi pretvori v kinetično energijo. Za potrebe izračuna podatkov o naklonu, ukrivljenosti pobočij in naklonskega potenciala smo uporabili digitalni model višin za območje Slovenije z ločljivostjo 25×25 m (Gurs, 2005).

Površinski vodotoki

Voda igra pomembno vlogo pri procesu transporta drobirskih tokov v nižje ležeča območja (npr. Mikoš, 2001). Podatkovni niz površinskih vodotokov (Arso, 2005) predstavlja osnovo za izračun dveh vplivnih dejavnikov, *oddaljenost od vodotokov* in *energetski potencial vodotokov*.

Potencialna žarišča drobirskih tokov morajo gravitirati v vodotok, da se lahko zgodi transport drobirskega materiala po njem v dolino. Čim bližje vodotoku je žarišče tem večja je možnost, da večja količina materiala iz žarišča (območja nastanka/sprožitve, tudi inicialnega območja) zdrsne v strugo po kateri lahko potuje kot drobirski tok.

Energetski potencial vodotokov sodi med transportne vplivne dejavnike za nastanek drobirskih tokov, ki po sprožitvi toka na območju nastanka/sprožitve vplivajo na njegovo potovanje. Energetski potencial posameznega vodotoka je določen z razmerjem med njegovo višino in dolžino ter predstavlja stopnjo relativnega padca poti oziroma materiala vzdolž struge vodotoka, po kateri potuje. Večja ko je vrednost tega razmerja, večja je možnost nastanka oziroma transporta materiala po nastanku drobirskega toka na območju nastanka/sprožitve.

Pojavi drobirskih tokov

Pretekli pojavi drobirskih tokov so v Sloveniji slabo dokumentirani. Vzrok takemu stanju je redkost pojavov in seveda šele nedavno zavedanje pomena evidenc oziroma katastra pojavov, ki podrobneje opisujejo posamezne lokacije, sprožitelje in včasih tudi škodo, ki jo povzročijo. Na podlagi podatkov o desetih historičnih in recentnih drobirskih tokovih, pridobljenih iz zapisov in terenskih opazovanj ter šestih domnevnih pojavih, določenih na podlagi aero posnetkov, smo določili območja nastanka/sprožitve in transportna območja drobirskih tokov. Preglednica 1 podaja osnovne informacije pojavov drobirskih tokov v severni in zahodni Sloveniji, katerih skupna površina obsega 3,99 km^2, ki so se skupaj razprostirali na 6385-ih celicah, od katerih jih je 24 ležalo na iz nadaljnjih analiz izločenem območju.

Metodologija

Iz opisa nastanka, proženja, potovanja in razlitja drobirskega toka izhajajo tudi vplivni prostorsko-časovni dejavniki, ki drobirski tok povzročijo, oziroma omogočijo njegovo potovanje in akumulacijo. Po sproženju drobirskega toka ali plazu, iz katerega se razvije drobirski tok, morajo biti dani pogoji za njegovo potovanje, ki jih določajo naklon in konveksna oblika pobočja ali pa ustrezni pogoji v strugi vodotoka. Povzročilne dejavnike, ki prispevajo k nastanku in sprožitvi materiala, smo imenovali **inicialne dejavnike**, tiste, ki določajo gibanje drobirskega toka pa smo poimenovali **transportne dejavnike**. V napoved dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov nismo vključili območij akumulacije, saj je za modeliranje njihovega nastanka oziroma določitve območij potrebnih več podatkov, pridobljenih s podrobim terenskim po-

Št.	A (km^2)	Lokacija	Št.	A (km^2)	Lokacija
1	0,368	Presušnik, Karavanke	9	0,089	Ciprnik, Tamar
2	0,039	Mlinca, Karavanke	10	0,062	Trebiža, Karavanke
3	0,037	Mlinca-Žakelj, Karavanke	11	0,224	Stovže, Julijske Alpe, Trenta
4	0,034	Dobršnik, Karavanke	12	0,019	Koseč, Julijske Alpe, dolina Soče
5	0,082	Belca 1, Karavanke	13	0,168	Lokavec, Vipavska dolina
6	0,157	Kurji graben, Karavanke	14	0,498	Koroška Bela, Karavanke
7	0,048	Belca 2, Karavanke	15	0,149	Čedca, Karavanke
8	0,136	Suhelj, Karavanke	16	1,873	Kropa, Jelovica

Preglednica 1. Osnovne informacije pojavov drobirskih tokov v severni in zahodni Sloveniji.

Table 1. Basic information on debris-flow occurrence in N and W Slovenia.

pisom vzorčnega števila vršajev in z analizami visokoločljivega digitalnega modela reliefa, napoved akumulacijskih območij pa vsebuje tudi hidravlično modeliranje s posebnimi programski orodji.

Izpostaviti velja, da v prispevku predstavljena metoda zaradi pomanjkanja reprezentativnega vzorca drobirskih tokov temelji na izkustvenem pristopu, ovrednotena pa je z oceno kakovosti napovedi šestnajstih pojavov drobirskih tokov v Sloveniji. Pri izdelavi poenostavljenega modela za območje celotne Slovenije v merilu 1 : 250.000 smo uporabili le najpomembnejše vplivne prostorsko-časovne dejavnike, prav tako pa v model nismo vključili parametrov dvo ali več faznega obnašanja drobirskih tokov. Vse analize in modeli so bili izdelani v GISu. Po načinu prispevka informacije posameznega prostorsko-časovnega dejavnika v končni model napovedi so ti lahko uteženi dejavniki (UD v Preglednici 2), katerih razredi prispevajo k modelu z vrednostmi med 0 in 1, ali pa izločilni dejavniki (ID v Preglednici 2), ki s svojimi vrednostmi določajo območja, ki so izločena iz nadaljnih operacij, torej območja, kjer se določen dogodek ne more zgoditi.

Preglednica 2 prikazuje le najpomembnejše prostorsko-časovne dejavnike, ki vplivajo na nastanek in transport drobirskih tokov in ki so bili uporabljeni v postopku izdelave modela dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji. Poleg dejavnikov, navedenih v preglednici 2, na pojavljanje, transport in odlaganje seveda vplivajo še drugi prostorsko-časovni dejavniki, ki pa so bili za potrebe analiz v merilu 1 : 250.000 izločeni zaradi preobsežnosti izračunov oziroma zaradi prepodrobnih geoloških, geomehanskih in geomorfoloških značilnosti posameznih območij, litoloških členov in fizikalnih lastnosti toka. Primarni namen analize je prikazati območja v Sloveniji, kjer je pojavljanje drobirskih tokov možno in kjer bi morali za potrebe posegov v prostor izvesti dodatne podrobnejše terenske in laboratorijske raziskave ter modeliranje. Kljub dejstvu, da smo za evalvacijo modelov uporabili relativno podrobne podatke o pojavih drobirskih tokov, pa namen modela ni natančna opredelitev lokacij nastanka in transporta ter izpostavljenosti posameznih objektov. Model služi le kot opozorilna informacija, ki določa območja nadaljnih podrobnejših ukrepov.

Priprava podatkov vplivnih prostorsko-časovnih dejavnikov

Litologija

Litostratigrafske člene izvorne geološke karte (Buser, v tisku) smo na podlagi strokovne ocene razvrstili v osem razredov glede na dovzetnost litološkega člena za pojavljanje drobirskega toka. Podoben pristop sta izbrala Marchi in D'Agostino (2001), Ceriani in sodelavci (2000) pa so vrednostim, ki določajo dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov posameznih litoloških členov, dodali še utež glede na delež površine člena v vsakem prispevnem območju vršaja. Zaradi obsežnosti območja analiz smo se odločili za izkustveni pristop k določitvi ocen litoliških členov.

Pri kriteriju razvrščanja posameznega litostratigrafskega člena iz Geološke karte Slovenije v merilu 1 : 250.000 (Buser, v tisku) v razrede dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov smo upoštevali značilnosti kamnine, ki pogojujejo nastanek drobirskega toka. Za nastanek le-tega morajo biti z vidika litoloških dejavnikov izpolnjeni trije pogoji. Na potencialnem območju za nastanek drobirskega toka morajo (1) obstajati kamnine, ki dajejo grob kamninski material (drobir) in (2) kamnine, ki dajejo komponento drobne frakcije – to so gline, melji in peski, pri čemer pa (3) glinasta frakcija ne sme prevladovati. Grob nekoherenten kamninski material običajno izvira iz magmatskih in karbonatnih kamnin, pri klastitih pa iz peščenjakov, breč in konglomeratov ter njihovih pobočnih nanosov, torej moren, gruščev in melišč. Fin koherenten material običajno izvira iz polhribin, pobočnih nanosov, pa tudi klastitov. Posebno obravnavo zahtevajo nekateri tipi aluvialnih nanosov, ki po svoji zrnski sestavi ustrezajo lastnostim materiala primernega za drobirske tokove, a se nahajajo na ravninskih predelih. Na nivoju merila izdelanega modela dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov je bilo razlikovanje med različnimi tipi aluvialnih nanosov nemogoča. Obenem se vse enote znotraj te skupine nahajajo na ravninskih predelih (enote kot so pobočne morene, tili, grušči, breče, melišča in skalni podori so razvrščeni posebej), zato je skupina »aluvialni nanosi« razvrščena v najnižji razred dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Preglednica 3 prikazuje končno razvrstitev skupin litoloških členov glede na njihovo dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov in vrednosti razredov po normalizaciji. V primeru razredov 5 in 6 smo opravili strokovni popravek razvrstitve posameznih enot zaradi posebnih pogojev dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Tako so bila območja na stiku (torej ob geoloških mejah) med klastiti in karbonati ter med klastiti in magmatskimi kamninami razvrščena v višji razred dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov.

Vrsta kamnine v preglednici 3 se nanaša na opise litostratigrafskih enot Geološke karte Slovenije v merilu 1 : 250.000 (Buser, v tisku). Podrobne opise litostratigrafskih enot pa lahko bralec najde v literaturi Komac (2005) ali Komac et al. (2005).

Oddaljenost od prelomov in narivov

Izhajajoč iz predpostavke, da so kamnine v nekem pasu ob večjih prelomih in narivih zdrobljene ter zato bolj podvržene preperevanju in drobljenju, kar zagotavlja več materiala za potencialne drobirske tokove, smo kot dodatni vplivni dejavnik uporabili območja v oddaljenosti 50-ih metrov na vsako stran od preloma ali nariva (N = 1). Taka območja prispevajo k večji dovzetnosti litoloških členov za pojavljanje drobirskih tokov, zato je bila ocena podvrženosti litološkega člena v območju 50-metrskega pasu od posameznega preloma po-

Preglednica 2. Najpomembnejši prostorsko-časovni dejavniki, ki vplivajo na nastanek drobirskih tokov in so bili uporabljeni v postopku izdelave modela dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji. UD predstavlja oznako za uteženi dejavnik v modelu, ID pa izločitveni dejavnik.

Inicialni dejavniki	Transportni dejavniki
litološka zgradba terena (UD), oddaljenost od prelomov (UD), naklon terena (ID, UD), naklonski potencial (UD) in padavine (UD).	konkavnost oblike pobočja (UD), energetski potencial vodotokov (UD) in oddaljenost od površinskega vodotoka (UD).

Table 2. The most significant spatio-temporal factors that influence the debris-flow occurrence, which were used for the calculation of the debris-flow susceptibility model in Slovenia. UD stands for weighted factor and ID stands for rejection factor.

Preglednica 3. Razvrstitev kamninskih tipov glede na njihovo dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov.

Table 3. Lithological types (Vrsta kamnina) and estimation of their susceptibility to debris-flow.

Dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov	Vrsta kamnine	A (%)	N – Vrednost razreda po normalizaciji
1	aluvialni nanosi	17,17 %	0,00
2	polhribine (gline, peski, melji)	12,11 %	0,14
3	magmatske kamnine (tonaliti, idr.)	1,83 %	0,29
4	karbonati (brez vložkov drugih kamninami oz. brez menjavanja z drugimi kamninami)	35,32 %	0,43
5*	klastiti	19,38 %	0,57
6*	klastiti z vložki karbonatnih kamnin	10,10 %	0,71
7	grušči, breče, skalni podori, melišča	3,05 %	0,86
8	pobočne morene, tili	1,04 %	1,00

*V šesti razred so bile razvrščene celice, ki mejijo na kamnine 5. in 4. razreda, v peti razred pa so bile razvrščene celice, ki mejijo na kamnine 5. in 3. razreda. / Pixels that touch 5th and 4th class were classfied into the 6th and pixels that touch 5th and 3rd class were classfied into the 5th class.

večana za en razred. Pri tem smo prispevek prelomov pri dveh razredih z največjo dovzetnostjo za pojavljanje drobirskih tokov zanemarili zaradi argumenta kronološkega sosledja odlaganja sedimentov teh dveh skupin po večjih regionalnih tektonskih aktivnostih.

Padavine

Pomen padavin pri pojavljanju drobirskih tokov je bil izpostavljen že v uvodnem poglavju (za vire glej Uvod). Glede na relativno večjo količino vode, ki je potrebna za sprožitev drobirskega toka v primerjavi s sprožitvijo zemeljskega plazu, smo se odločili, da so podatki o maksimalnih 48-urnih padavinah primernejši za modeliranje dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov od podatkov o maksimalnih 24-urnih padavinah, medtem ko podatki o dolgotrajnejših obdobjih padavin (npr. za obdobje enega meseca) slabše izrazijo območja maksimalnih padavin. Podatki o vplivnem dejavniku maksimalne 48-urne padavine (mm/48 urah) so bili že v osnovi razdeljeni v 16 razredov z razponom 30 mm. Ker je mejna vrednost količine padavin, pri kateri se sprožijo drobirski tokovi, težko določljiva oziroma se močno spreminja, smo izhajali iz predpostavke, da obilnejše in pogostejše padavine pomenijo večjo možnost pojavljanja drobirskih tokov. Na podlagi takega predvidevanja smo razredu z največjo količino padavin pri normalizaciji pripisali največjo vplivno vrednost parametra (N = 1), razredu z najmanjšo količino padavin pa najmanjšo vplivno vrednost parametra (N = 0) (Preglednica 4). Slednja predpostavka ne pomeni, da se na območjih z najmanjšo količino padavin drobirski tokovi ne morejo pojavljati temveč pomeni le, da je na teh območjih prispevek padavin v primerjavi z drugimi vplivnimi dejavniki minimalen.

Preglednica 4. Razredi dejavnika »maksimalne 48-urne padavine«.

Table 4. »48-hour rainfall intensity« classes and estimation of their susceptibility to debris-flow.

Razred	Količina padavin (mm/48 ur)	A (%)	N – Vrednost razreda po normalizaciji
1	< 120	6,72 %	0,00
2	120 – 150	34,06 %	0,07
3	150 – 180	23,50 %	0,13
4	180 – 210	12,15 %	0,20
5	210 – 240	7,55 %	0,27
6	240 – 270	4,37 %	0,33
7	270 – 300	3,32 %	0,40
8	300 – 330	2,46 %	0,47
9	330 – 360	1,48 %	0,53
10	360 – 390	0,98 %	0,60
11	390 – 420	0,89 %	0,67
12	420 – 450	0,71 %	0,73
13	450 – 480	0,59 %	0,80
14	480 – 510	0,60 %	0,87
15	510 – 540	0,33 %	0,93
16	540 – 570	0,30 %	1,00

Naklon pobočja

Nekateri avtorji (Benda & Cundy, 1990) navajajo, da se drobirski tokovi sedimentirajo pri nagibih, večjih od 3,5°. Mazengarb (2004) ter Toyos in sodelavci (2008) so minimalni kot določili pri 5°, Melelli in Taramelli (2004) pri 7°, Odbor za vršaje (*angl. Committee on Alluvial Fan Flooding*) (1996) pa pri naklonih med 6° in 8° za drobirske tokove z najvišjim razmerjem med materialom in vodo, ki so tudi najbolj uničujoči in nevarni. Terensko opazovanje na pobočju odloženih naravnih nevezanih materialov pokaže, da se na pobočju z naklonom, večjim od 45°, gruščnat in preperinski material ne more zadržati v dovolj veliki debelini, da bi lahko predstavljal potencialno mesto za

nastanek drobirskega toka. Naklon pobočja pod 5° predstavlja edini izločitveni dejavnik med uporabljenimi v modelu napovedi.

Zaradi navedenega so bila iz nadaljnje analize izločena vsa območja z nakloni manjšimi od 5°. V najnižji razred z oznako 0, v katerem je verjetnost pobočnega premikanja zanemarljivo majhna, smo uvrstili vsa pobočja z nagibom med 5° in 9°, ter vsa pobočja z naklonom večjim od 45°, pri katerih način transporta materiala ne sodi več med plazenja temveč je definiran kot zdrs oziroma padec kamninskih gmot. Pobočja z nakloni med 9° in 45° smo razvrstili v šest razredov z razponom 6°. Pri razvrstitvi razredov in posredno določitvi njihovega vpliva smo izhajali iz načela, da so strmejša pobočja bolj podvržena pobočnim masnim premikom. Razredi vplivnega dejavnika »naklon pobočja« in njihove vrednosti po normalizaciji so predstavljene v preglednici 5.

Preglednica 5. Razredi dejavnika »naklon pobočja«.

Table 5. »Slope angle« classes and estimation of their susceptibility to debris-flow.

Razred	Naklon (°)	A (%)	N – Vrednost razreda po normalizaciji
-	< 5°	27,77%	-
0	5° - 9° in > 45°	15,77%	0,00
1	9° - 15°	19,97%	0,17
2	15° - 21°	15,23%	0,33
3	21° - 27°	10,02%	0,50
4	27° - 33°	6,44%	0,67
5	33° - 39°	3,55%	0,83
6	39° - 45°	1,25%	1,00

Naklonski potencial po višinskih pasovih

Izhodišče vključitve sloja »naklonski potencial po višinskih pasovih« je bila empirična predpostavka, da pogostost in velikost drobirskih tokov narašča z višanjem nadmorske višine. Kot že predhodno omenjeno, za določitev vpliva posameznih razredov znotraj dejavnika ni bilo na voljo reprezentativnega števila vzorcev, saj so bili ti uporabljeni za validacijo modelov. Zato smo za potrebe razvrstitve pasov nadmorske višine, združitve v nove razrede in določitve normalizacijskih vrednosti, izvedli analizo povprečnih naklonov pobočij znotraj stometrskih višinskih pasov.

Rezultat je nov generično pridobljen dejavnik, imenovan naklonski potencial po višinskih pasovih, ki nosi informacijo o nadmorskih višinah. Ta informacijski sloj nosi poenostavljeno informacijo o potencialni energiji materiala drobirskega toka, ki se ob sprožitvi pretvori v kinetično energijo. 29 razredov stometrskih višinskih pasov (R, Preglednica 6) smo razdelili na osem razredov glede na spremembe trenda porazdelitve povprečnega naklona (PN, Preglednica 7), kar pomeni, da so bili višinski pasovi na novo razvrščeni na podlagi opaznejše spremembe povprečnega naklona. V Preglednici 6 je z oznako »X« v potemnjenih poljih prikazana razvrstitev višinskih razredov v nove razrede, Preglednica 7 pa prikazuje prostorsko porazdelitev dejavnika in normalizirane vrednosti novih razredov za sloj »naklonski potencial po višinskih pasovih«. Do razdelitev, ki sta prikazani v obeh preglednicah

		PN (°)						
R	N.m.v. (m)	0-5	5-10	10-13	13-15	15-17	17-19	19-21
1	< 99		X					
2	100-199	X						
3	200-299		X					
4	300-399			X				
5	400-499				X			
6	500-599				X			
7	600-699					X		
8	700-799						X	
9	800-899						X	
10	900-999							X
11	1000-1099							X
12	1100-1199							X
13	1200-1299							X

		PN (°)
R	N.m.v. (m)	21-46
14	1300-1399	X
15	1400-1499	X
16	1500-1599	X
17	1600-1699	X
18	1700-1799	X
19	1800-1899	X
20	1900-1999	X
21	2000-2099	X
22	2100-2199	X
23	2200-2299	X
24	2300-2399	X
25	2400-2499	X
26	2500-2599	X
27	2600-2699	X
28	2700-2799	X
29	> 2800	X

Preglednica 6. Razporeditev razredov stometrskih višinskih pasov (R) glede na razrede povprečnih naklonov (PN) iz Preglednice 7.

Table 6. »Elevation classes« (R) and estimation of their susceptibility to debris-flow according to average slope angle in each class (PN, taken from the Table 7).

Razred	PN (°)	Razpon razreda po n.m.v. (m)	A (%)	N – Vrednost razreda po normalizaciji
1	0-5	100 – 199	7,60	0,00
2	5-10	0 – 99 in 200 – 299	19,17	0,14
3	10-13	300 – 399	14,96	0,29
4	13-15	400 – 599	23,35	0,43
5	15-17	600 – 699	8,67	0,57
6	17-19	700 – 899	11,53	0,71
7	19-21	900 – 1299	9,98	0,86
8	21-46	1300 – 2864	4,73	1,00

Preglednica 7. Razredi dejavnika »naklonski potencial po višinskih pasovih«.

Table 7. Classes of factor »Slope angle potential« by elevation classes.

(Preglednici 6 in 7), smo prišli po številnih poskusih. Za izbrano delitev ni direktne utemeljene osnove, ki bi temeljila na terenskih opazovanjih, vendar se je v nadaljnjih modeliranjih pokazala kot smiselna.

Energetski potencial vodotokov

Energetski potencial vodotokov (EPV) je lastnost, ki je v primeru modeliranja pojavov drobirskih tokov vezana na linijske pojave – vodotoke in predstavlja poenostavitev vplivnega dejavnika oblikovanosti struge, po kateri potencialno poteka transport materiala. Določitev EPV za posamezno lokacijo (celico) je bila sestavljena iz več korakov. Najprej smo za vsak segment površinskega vodotoka (ravno linijo, ki predstavlja približek naravne linije vodotoka) izračunali povprečni naklon (padec vzdolž segmenta). V naslednjem koraku smo z uporabo kernelske metode (*angl. Kernel Density*) razporedili vrednost izračunanega povprečnega padca po površini okoli vsakega segmenta vodotoka na območju oddaljenosti 100 metrov od linije. Pripisana vrednost obravnavanega elementa, v danem primeru je to povprečni padec vzdolž elementa, je pri kernelski metodi izražena s prostornino pod porazdelitveno krivuljo, vrednosti pa se z oddaljenostjo od elementa zmanjšujejo (Esri, 2006). Vrednosti izračunanega rastrskega sloja smo razvrstili v 9 razredov glede na spremembe trendov v porazdelitvi frekvence pojavljanja (*angl. Natural Breaks – Jenks*; metoda naravnih mej). Metoda naravnih mej določi meje med skupinami podatkov na osnovi prevojev v trendih. Mejo določi tam, kjer se pojavijo relativno velike razlike med paroma sosednjih vrednosti, zato meje razredov niso enakomerno razporejene. Kernelska metoda se uporablja tako pri določanju vpliva cestnega omrežja na habitate kot tudi uporabnosti infrastrukturnih vodov v naseljih (Esri, 2006). Pripisano vrednost elementa, ki je v danem primeru linijsko izražen pojav transportne poti materiala, smo uporabili kot utežitveni dejavnik za razvrstitev posameznih delov vodotokov v razrede glede na njihov prispevek k potencialnemu transportu materiala. Enota, ki določa EPV je °/m^2 in predstavlja oceno prispevka posameznega dela struge k transportu materiala drobirskih tokov v odvisnosti od padca vzdolž toka površinske vode. Preglednica 8 prikazuje prostorsko porazdelitev dejavnika EPV in normalizirane vrednosti novih razredov za sloj »energetski potencial vodotokov«.

Preglednica 8. Razredi dejavnika »energetski potencial vodotokov«.

Table 8. »Stream energy potential« classes and estimation of their susceptibility to debris-flow.

Razred	Razpon razreda po gostoti (°/m^2)	A (%)	N – Vrednost razreda po normalizaciji
1	0 – 0,0138	88,72	0,000
2	0,0138 - 0,048301	5,23	0,125
3	0,048301 - 0,089703	2,68	0,250
4	0,089703 - 0,134554	1,58	0,375
5	0,134554 - 0,182856	0,92	0,500
6	0,182856 - 0,238057	0,50	0,625
7	0,238057 - 0,310509	0,26	0,750
8	0,310509 - 0,424363	0,09	0,875
9	0,424363 - 0,883227	0,02	1,000

Oddaljenost od površinskih vod

Glede na velikost celice rastrskih slojev in poznavanja dinamike drobirskih tokov smo razvrstili vpliv oddaljenosti od površinskih vod na razrede po 25 metrov. Največji vpliv ima najbližji razred, to je oddaljenost do 25 metrov od vodotoka. Vpliv se nato premosorazmerno zmanjšuje do oddaljenosti 75 metrov, ko se izniči. V slednji razred sodijo celice, ki so oddaljene od vodotoka za več kot 75 m. Razredi vplivnega dejavnika »oddaljenost od površinskih vod« in njihove vrednosti po normalizaciji so predstavljene v preglednici 9.

Preglednica 9. Razredi dejavnika »oddaljenost od površinskih vod«.

Table 9. »Distance to surface waters« classes and estimation of their susceptibility to debris-flow.

Razred	Razpon razreda glede na oddaljenost (m)	A (%)	Vrednost razreda po normalizaciji
1	0 – 25	6,46%	1,00
2	25 – 50	4,08%	0,67
3	50 – 75	4,75%	0,33
4	> 75 m	84,71%	0,00

Ukrivljenost površja

Na osnovi digitalnega modela višin z ločljivostjo 25 metrov smo izločili konkavne oblike terena, ki ustvarjajo primerne pogoje za potovanje drobirskih tokov kot dvo ali več faznih tokov. Vplivni dejavnik ukrivljenosti je razdeljen na dva tipa površja, na konveksna in ravna (ali neukrivljena) območja, kjer tok ne gravitira v neko skupno točko, temveč se razliva, ter na konkavna območja, kjer tok gravitira v kanal ali strugo. Informacijski sloj ima binarni značaj, torej le dve vrednosti, 0 za prvi tip in 1 za slednji tip območij. Razredi vplivnega dejavnika »ukrivljenosti« in njihove vrednosti po normalizaciji so predstavljene v preglednici 10.

Preglednica 10. Razredi dejavnika »ukrivljenost površja«.

Table 10. »Slope curvature« classes and estimation of their susceptibility to debris-flow.

Razred	Ukrivljenost površja	A (%)	Vrednost razreda po normalizaciji
0	konveksna in ravna območja (-0,5 > X < -8)	91,68	0
1	konkavna območja (-0,5 < X > -8)	8,32	1

Modeliranje dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov

Pri izdelavi modela dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov smo uporabili metodo linearne utežene vsote (Voogd, 1983). Določitev uteži posameznih vplivnih prostorsko-časovnih dejavni-

kov je bila zaradi pomanjkanja podatkov oziroma preskromne in heterogene populacije opazovanih dogodkov zahtevna naloga. Razponi uteži dejavnikov kot vhodni podatek pri izračunu modelov so bili določeni na podlagi strokovne ocene, kakovost modelov pa je bila ocenjena na podlagi populacije recentnih in historičnih pojavov drobirskih tokov. Omejitve ekspertnega pristopa so predvsem subjektivni vpliv tako na izbiro vplivnih prostorsko-časovnih dejavnikov kot tudi njihovega prispevka v modelu oziroma določitev uteži, zaradi česar je posamezna izbira ali odločitev težje opravičljiva. Ti oviri smo poskušali zaobiti z dobrim terenskim poznavanjem razmer, dolgoletnimi izkušnjami s področja raziskovanj pobočnih masnih premikov in njihovega praktičnega reševanja ter z izračunom več kombinacij uteži dejavnikov (Preglednica 11). Vsi rastrski informacijski sloji, ki podajajo lastnosti dejavnikov vpliva, imajo ločljivost celice 25 × 25 metrov, enako ločljivost imajo tudi vsi izračunani modeli napovedi.

Na osnovi opravljenih prostorskih analiz in predhodnih izkušenj pri dosedanjih analizah pojavov pobočnih masnih premikov smo določili vpliv posameznih prostorskih dejavnikov na dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov. Tako smo posamezni prostorski dejavnik razdelili na razrede, te pa nato normalizirali z enačbo 1.

$$NRV = \frac{1-(RV-\min)}{\max-\min} \qquad (1)$$

kjer *NRV* pomeni novo razvrščeno vrednost, *RV* predstavlja staro razvrščeno vrednost (zaporedno št. razreda), vrednost max predstavlja največjo vrednost vhodnega podatka (t.j. število razredov), vrednost min predstavlja najmanjšo staro vrednost (običajno 0) in število 1 predstavlja razpon vrednosti za *NRV*. Minimalna vrednost je bila postavljena na vrednost 0, ki pa v primeru modela utežene vsote ne predstavlja izločilnega dejavnika. Z normalizacijo je bila zagotovljena enakost podatkov pred postopkom modeliranja. Kvaliteta modelov je bila preverjena s testnim nizom šestnajstih pojavov drobirskih tokov, ki so se že zgodili.

Pri izračunu modela dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov smo uporabili metodo linearne obtežene vsote (prirejeno po Voogd, 1983). Rezultat modela je standardizirana stopnja verjetnosti nastanka pojava, ki v danem primeru izraža stopnjo dovzetnosti za pojavljanje drobirskega toka, izračunana po enačbi 2:

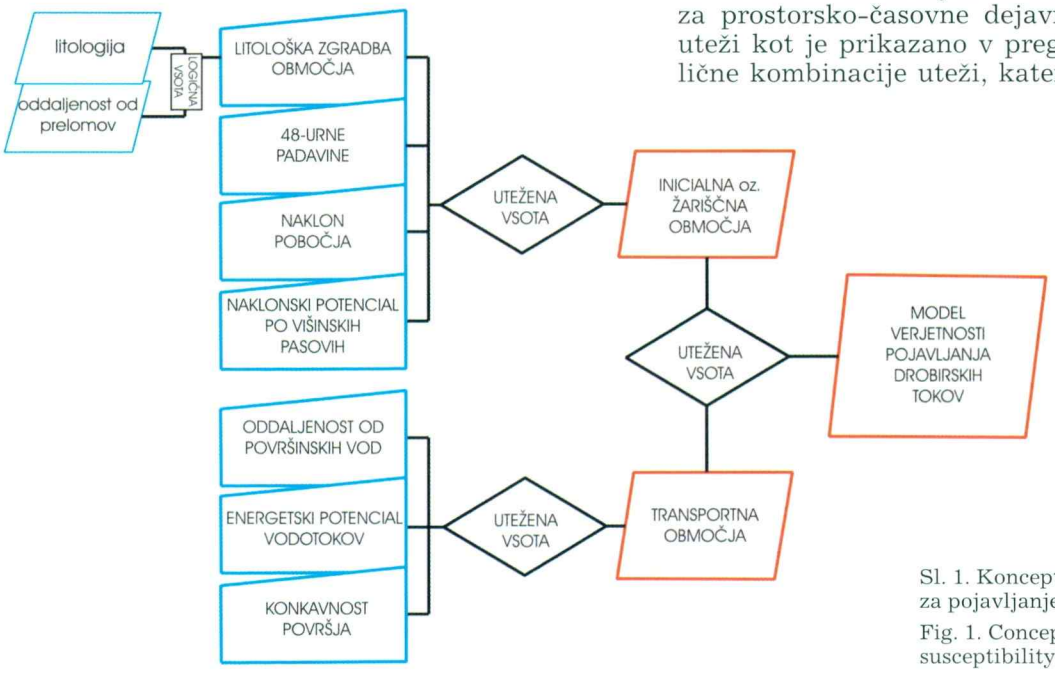
$$H = \sum_{j=1}^{n} w_j \times f_{ij}, \qquad (2)$$

kjer H predstavlja standardizirano relativno vrednost stopnje dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov (0 – 1), w_j predstavlja končno utež spremenljivke in f_{ij} predstavlja zvezno ali diskretno vrednost spremenljivke. Opisna vrednost dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov je bila določena šele po reklasifikaciji vrednosti v posameznem modelu.

Model je naravnan izključno v prostorsko napoved dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov in se ne loteva časovnih okvirov nevarnosti njihovega pojavljanja, prav tako pa ne napoveduje količine materiala, ki lahko po posameznem transportnem območju pripotuje na območja akumulacije.

Slika 1 prikazuje konceptualni model dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov, na podlagi katerega so bili izračunani matematični prostorski modeli. Inicialni vplivni dejavniki so bili po načelu linearne utežene vsote združeni v **inicialni informacijski sloj**. Po enakem postopku je bil izdelan **transportni informacijski sloj.** Oba sloja sta bila nato združena v končno napoved, ponovno z upoštevanjem njune pomembnosti za nastanek drobirskega toka. Različne kombinacije uteži posameznih dejavnikov so rezultirale v različnih modelih napovedi, ki so opisani v nadaljevanju.

Na osnovi izkušenj in referenčne literature smo za prostorsko-časovne dejavnike določili ocene uteži kot je prikazano v preglednici 11. Za različne kombinacije uteži, katerih skupna vsota je



Sl. 1. Konceptualni model dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov

Fig. 1. Conceptual debris-flow susceptibility model.

Preglednica 11. Razpon uteži za prostorsko-časovne dejavnike.
Table 11. »Weights intervals« for each of the spatio-temporal factor.

Prostorsko-časovni (P-Č) dejavnik	Oznaka	Razpon uteži dejavnika	*Korak*
Litologija združena z oddaljenostjo od prelomov in narivov	LITOTEK	0,14 – 0,23	*0,03*
48-urne padavine	PAD48	0,14 – 0,23	*0,03*
Naklon pobočja	NAKL	0,14 – 0,23	*0,03*
Naklonski potencial po višinskih pasovih	NMVPAS	0,06 – 0,15	*0,03*
Energetski potencial vodotokov	EPV100	0,14 – 0,23	*0,03*
Oddaljenost od površinskih vod	ODD_PV	0,10 – 0,19	*0,03*
Ukrivljenost površja	*UKRIV*	*0,09 – 0,18*	*0,03*

bila vedno 1 (oziroma 100 %) smo izračunali 672 linearnih modelov. Zaradi lažje primerjave so bili vsi modeli razdeljeni na 100 po površini enako velikih razredov, nato pa evalvirani s pomočjo testnega vzorca šestnajstih pojavov drobirskih tokov, ki so se razprostirali na 6385-ih celicah.

Pri izbranem pristopu evalvacije modelov dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov se pojavi nevarnost pretreniranosti modela (*ang. overtrained* tudi *over-fitting model*), ki sicer zelo dobro napoveduje ali prikazuje testno populacijo, a je ob prenosu na druge populacije neuporaben oziroma manj uporaben. To oviro smo zaobšli s tremi varovalkami. Prva varovalka je bila velika heterogenost testne populacije drobirskih tokov, saj so nekateri pojavi med njimi zelo netipični predstavniki drobirskih tokov (npr. Ciprnik, Slano Blato in Kropa) in model uspešno napoveduje tudi te. Druga varovalka je bilo povprečenje uteži najboljših modelov, s čimer smo delno izločili potencialni vpliv pretreniranosti. Kot tretjo varovalko smo pri iskanju najprimernejšega(ih) modela(ov) uporabili tudi najbolj ugodno/idealno razmerje med površino območja, dovzetnega za pojavljanje drobirskih tokov in številom celic testnega niza na istem območju. Manjše, ko je bilo območje in več testnih celic, ki jih je zajemalo, večja je bila nevarnost pretreniranja modela (v statistiki napaka beta). V obratnem primeru, ko je bilo območje preširoko pa smo se soočili z neučinkovitostjo napovedi modela (v statistiki napaka alfa, ko je hipoteza dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov potrjena, čeprav v resnici ne drži).

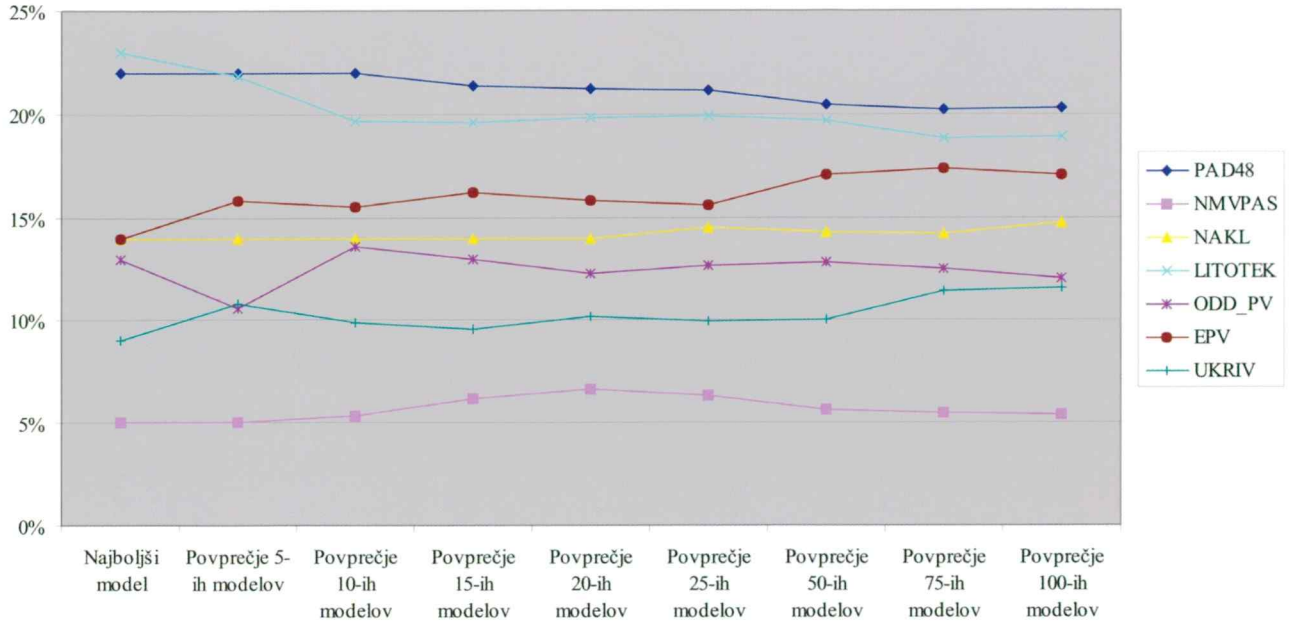
Rezultati in razprava

Analiza 672-ih modelov dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov je pokazala, da so najpomembnejši dejavniki, ki vplivajo na pojavljanje drobirskih tokov, količina 48-urnih padavin, geološke lastnosti terena in energetski potencial vodotokov, nekoliko manj pomembni pa so naklon pobočij, oddaljenost od površinskih voda ter ukrivljenost terena. Preglednica 12 prikazuje povprečne vrednosti uteži prostorsko-časovnih dejavnikov, vključenih v modele dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov, slika 2 pa grafično prikazuje spremembe vrednosti uteži za posamezne dejavnike.

Na sliki 3 je prikazana porazdelitev deleža 6385-ih celic testnega niza drobirskih tokov za polovico območja Slovenije, kjer je verjetnost pojavov večja. Porazdelitev je prikazana za sto najbolj uspešnih modelov na območjih, ki pripadajo zgornji polovici dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Zaradi preglednosti in računske ekonomičnosti so deleži prikazani za razrede po 5 % površja. Na isti sliki je porazdelitev deleža celic testnega niza drobirskih tokov glede na razrede najustreznejšega modela (POVP_100), izbranega iz povprečja stotih najuspešnejših modelov, prikazana z odebeljeno črto. Za model POVP_100 je najbolj očiten skok deleža drobirskih tokov v zadnjem razredu (35 % celic drobirskih tokov testnega niza), več kot 10 % deleža celic (več kot 2 × več od pričakovanega deleža) pa se nahaja še v treh razredih med 80 % in 95 %, v prvem (A (80–85 %)) slabih 16 %, v drugem (A (85–90 %)) 14 % in v tretjem (A (90–95 %)) slabih 12 %. Območje, ki je v Sloveniji dovzetno za pojavljanje drobirskih tokov obsega le predele, katerih naklon pobočja je večji od 5°. Vse celice testnega niza, ki ležijo na območjih z naklonom manjšim od 5°, teh je 24 oziroma 0,38 % površine testnega niza drobirskih tokov, obravnavamo kot napako modela(ov). Po-

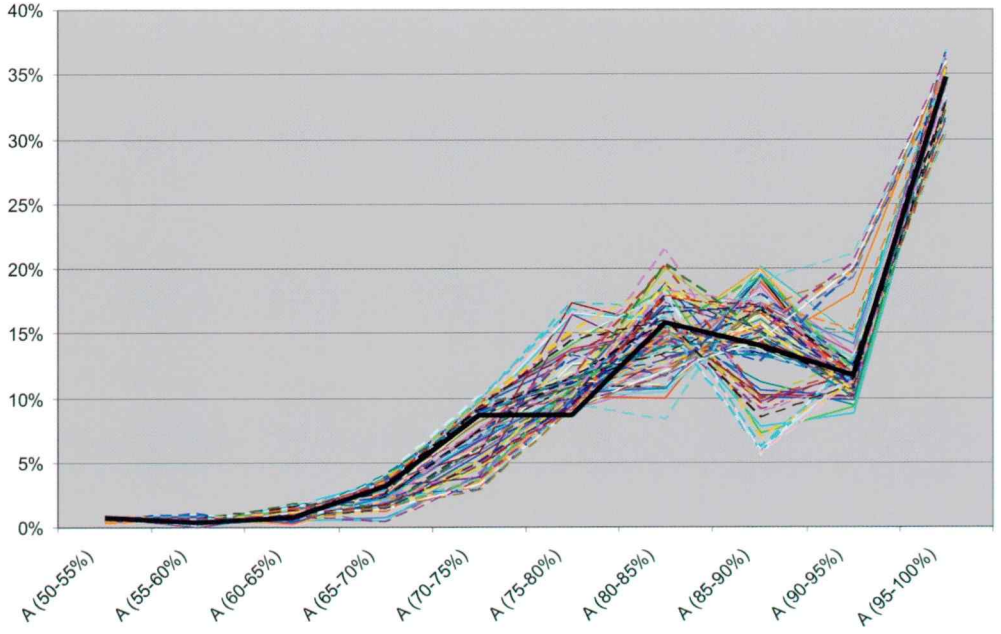
Preglednica 12. Povprečne vrednosti uteži prostorsko-časovnih dejavnikov, vključenih v modele dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Razlaga prostorsko-časovnih dejavnikov (P-Č dejavniki) je podana v preglednici 11.
Table 12. Average values of weights of spatio-temporal factors, used for the debris-flow susceptibility models calculations. Explanation of spatio-temporal factors (P-Č dejavniki) is given in the Table 11.

Modeli / P-Č dejavniki	IME	LITOTEK	PAD48	NAKL	NMVPAS	EPV100	ODD_PV	UKRIV
Najboljši model	NAJ	0,2300	0,2200	0,1400	0,0500	0,1400	0,1300	0,0900
Povprečje 5-ih modelov	POVP_5	0,2180	0,2200	0,1400	0,0500	0,1580	0,1060	0,1080
Povprečje 10-ih modelov	POVP_10	0,1970	0,2200	0,1400	0,0530	0,1550	0,1360	0,0990
Povprečje 15-ih modelov	POVP_15	0,1960	0,2140	0,1400	0,0620	0,1620	0,1300	0,0960
Povprečje 20-ih modelov	POVP_20	0,1985	0,2125	0,1400	0,0665	0,1580	0,1225	0,1020
Povprečje 25-ih modelov	POVP_25	0,1988	0,2116	0,1448	0,0632	0,1556	0,1264	0,0996
Povprečje 50-ih modelov	POVP_50	0,1970	0,2044	0,1430	0,0566	0,1706	0,1282	0,1002
Povprečje 75-ih modelov	POVP_75	0,1884	0,2024	0,1420	0,0544	0,1736	0,1252	0,1140
Povprečje 100-tih modelov	POVP_100	0,1889	0,2029	0,1472	0,0542	0,1706	0,1201	0,1161



Sl. 2. Grafični prikaz povprečnih vrednosti uteži prostorsko-časovnih dejavnikov, vključenih v modele dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Legenda prostorsko-časovnih dejavnikov je podana v preglednici 11.

Fig. 2. Visualisation of average weight values of spatio-temporal factors used to produce debris-flow susceptibility model (on axis X from left to right: best (over trained) model, average of 5, 10, 15, 20, 25, 50, 75, and 100 models). Explanation of factors' abbreviation is given in Table 11.



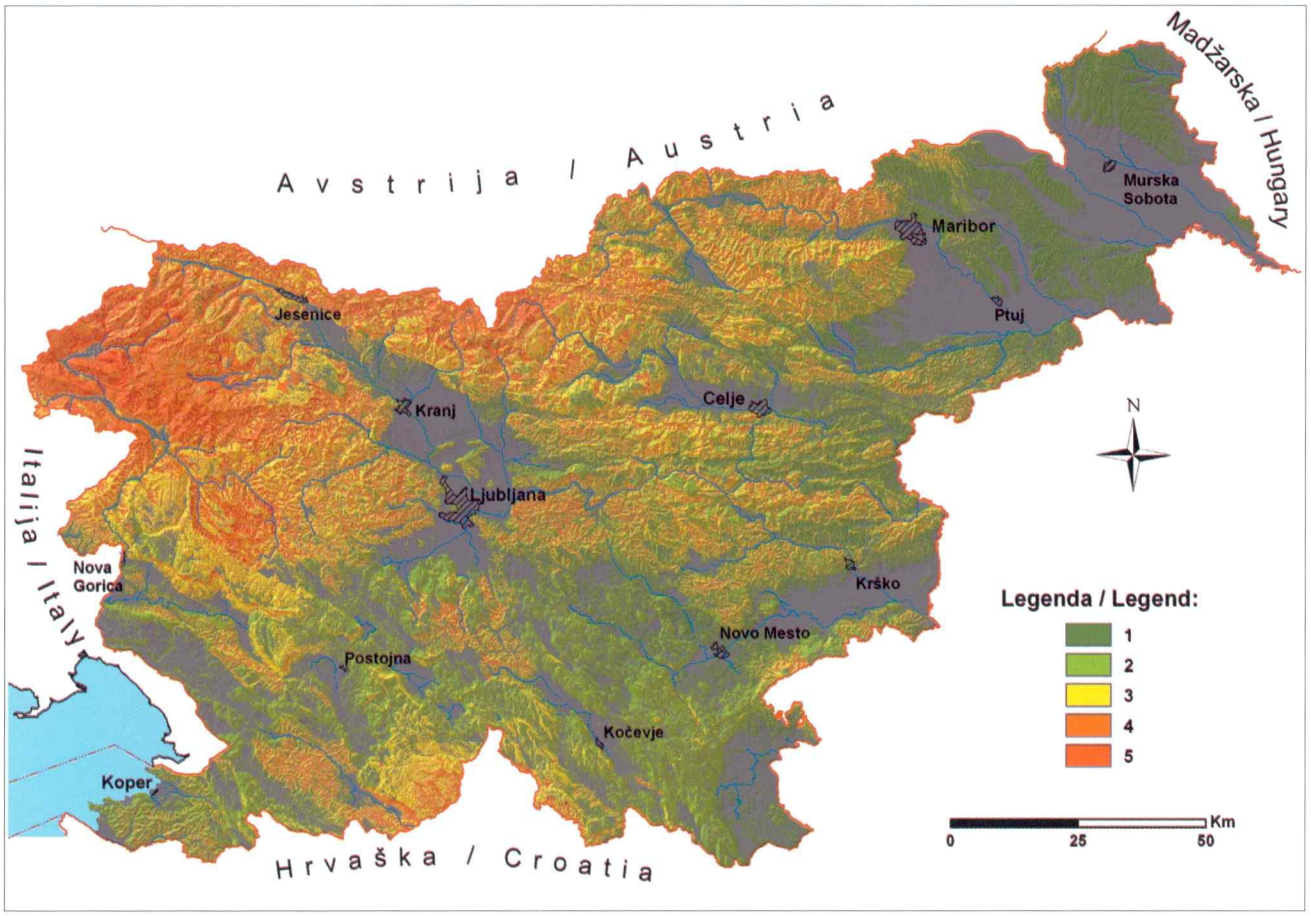
Sl. 3. Porazdelitev deleža celic testnega niza v zgornjih 50-ih odstotkih površja Slovenije (območja, ki pripada zgornji polovici dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov), razdeljenih na razrede po 5 % površja. Z odebeljeno črto je prikazana porazdelitev deležev drobirskih tokov po razredih za model POVP_100.

Fig. 3. Test sample area distribution in the upper 50 % of the Slovenian area (the half of the area where the debris-flow susceptibility is higher) divided into ten classes by 5 %. Bold line represents the debris-flow distribution for the chosen model titled POVP_100.

razdelitev deležev celic testnega niza drobirskih tokov je prikazana po razredih, katerih površina meri 5 % skupne površine.

Glede na omenjeno možnost pretreniranja modela smo se odločili, da kot najprimernejše uteži izberemo povprečje stotih najuspešnejših modelov dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Za najprimernejši model se je za najboljšega izkazal model POVP_100, prikazan na sliki 4, katerega prostorsko-časovni dejavniki so sledeči. Za najpomembnejši dejavnik so se izkazale 48-urne padavine, ki prispevajo dobrih 20 %, sledijo lastnosti kamnin v kombinaciji z vplivom tektonskih struktur, ki prispevajo slabih 19 %, 17 % prispeva dejavnik energetski potencial vodotokov, slabih 15 % naklon pobočij, 12 % oddaljenost od površinskih vod, nekaj manj, 11,6 % ukrivljenost površja, najmanj pa nadmorska višina lokacije (5,4 %).

Model POVP_100, prikazan na sliki 4, podaja prostorsko napoved dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji, kjer so območja z neznatno oziroma majhno dovzetnostjo za pojavljanje drobirskih tokov označena z zelenimi odtenki (razreda 1 in 2), območja s srednjo veliko dovzetnostjo z rumeno barvo (razred 3), območja z veliko z oranžno (razred 4) in območja z zelo veliko dovzetnostjo za pojavljanje drobirskih tokov z rdečo barvo (razred 5). Podrobnejši pogled odkrije, da predstavljajo rdeče obarvana območja poti premikanja materiala oziroma drobirskih



Sl. 4. Najboljši (in hkrati najrealnejši) model dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji (POVP_100), pridobljen z linearnim modelom prostorsko-časovnih dejavnikov kot so opisani v preglednici 13. Oznake v legendi pomenijo dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov: 1 – neznatna; 2 – majhna; 3 – srednje velika; 4 – velika; 5 – zelo velika. Siva območja pripadajo površju Slovenije, kjer je dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov zanemarljiva.

Fig. 4. Most appropriate and real debris-flow susceptibility model for Slovenia (POVP_100) calculated from the linear function of spatio-temporal factors as described in Table 13. Values in the legend stand for the debris-flow susceptibility: 1 – insignificant; 2 – low; 3 – medium; 4 – high; 5 – very high. The grey areas belong to the areas in Slovenia where the debris-flow susceptibility is negligible.

tokov, torej transportna območja, kjer ima premikajoči se material dejansko največjo moč in predstavlja tam tudi največjo nevarnost za ogrožence. Oranžno in v manjši meri tudi rumeno označena območja predstavljajo predvsem območja nastanka/sprožitve, ki zaradi svojih geoloških in geomorfoloških lastnosti predstavljajo potencialni vir material, ki bi lahko v prihodnosti v obliki drobirskega toka potoval v dolino. Slednja območja predstavljajo le omejeno nevarnost za potencialne ogrožence, saj brez prisotnosti transportnih območij, večidel predstavljena z rdečo barvo, drobirski tokovi na teh območjih večjih razsežnosti ne morejo razviti.

Na podlagi lastnosti porazdelitve vrednosti modela, natančneje metode naravnih mej v porazdelitvi deleža površine celotnega območja glede na vrednost modela POVP_100 (porazdelitve vrednosti modela ne smemo zamenjati s porazdelitvijo površja raziskovanega območja na enake razrede po površini, kot je prikazano na slikah 3 in 4), smo model napovedi razdelili na šest razre-

Preglednica 13. Porazdelitev površine razredov dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji za najprimernejši model (POVP_100). Stolpec »A« predstavlja delež površine razreda, »Vrednosti modela« podajajo razpon vrednosti modela POVP_100, ki se raztezajo med 0 in 1, »Dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov« opisno podaja dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov in »Delež drobirskih tokov« delež drobirskih tokov v razredu dovzetnosti za pojavljanje.

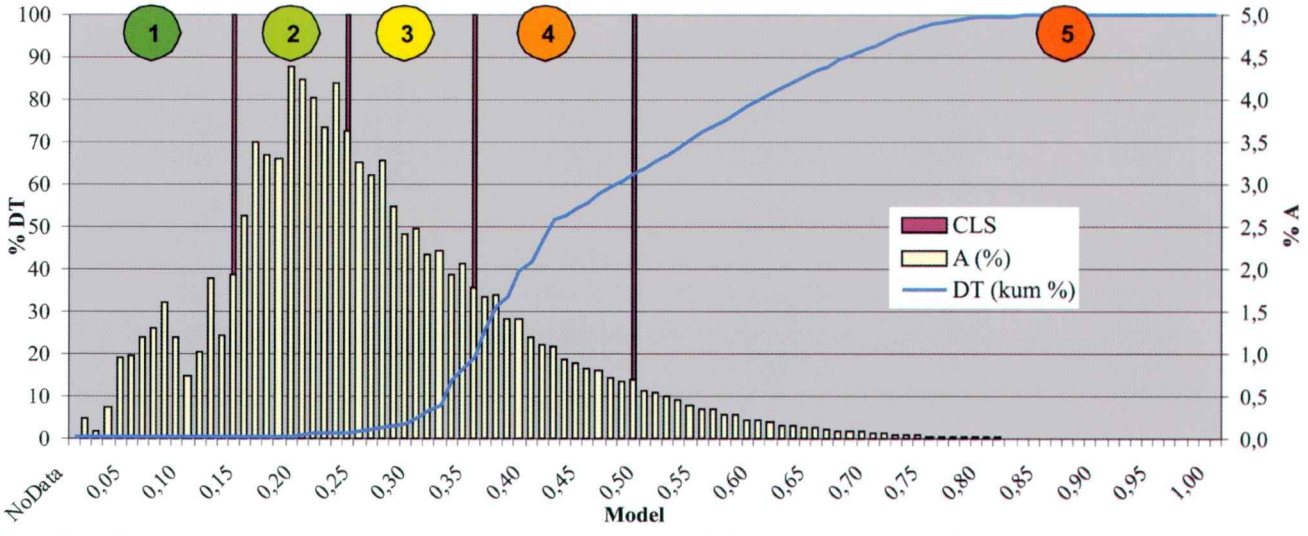
Razred	A (%)	Vrednosti modela	Dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov	Delež drobirskih tokov (%)
0	27,84	-	Zanemarljiva	0,38*
1	10,18	0 – 0,134	Neznatna	0,00
2	27,86	0,134 – 0,243	Majhna	0,96
3	19,48	0,243 – 0,353	Srednje velika	17,92
4	10,66	0,353 – 0,494	Velika	43,40
5	3,99	0,494 – 1,00	Zelo velika	37,35

Table 13. Debris-flow susceptibility classes area distribution in Slovenia for the POVP_100 model. Column »A« represents the proportion of the area, »Vrednosti modela« represents the interval of the POVP_100 model values that span from 0 to 1, »Dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov« descriptively represents the debris-flow susceptibility, and »Delež drobirskih tokov« represents the portion of the test sample pixels in each susceptibility class.

*0,38 % celic testnega niza drobirskih tokov se pojavlja na območjih, kjer ni možnosti nastanka opazovanih pojavov.
*0,38 % of the testing samples pixels are located in the areas where debris-flow occurrence in negligible.

dov dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov kot jih prikazuje preglednica 13. V najvišji, peti razred so bila uvrščena območja, kjer je bilo drobirskih tokov 9-krat več od pričakovanih, skupaj 37,3 %. Površina razreda predstavlja zgornje 4 % površin po dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. V razred z veliko dovzetnostjo za pojavljanje drobirskih tokov s površino 10,6 % je bilo uvrščenih 43,4 % vseh drobirskih tokov, v razred s srednjo dovzetnostjo za pojavljanje drobirskih tokov, ki obsega 19,5 % površine, pa je bilo uvrščenih 18 % drobirskih tokov. Na območjih razreda z majhno dovzetnostjo za pojavljanje drobirskih tokov, ki obsega 28 % površine se pojavlja slab odstotek drobirskih tokov, na območjih z neznatno dovzetnostjo za pojavljanje drobirskih tokov pa se na 10-ih % površine drobirski tokovi ne pojavljajo. Pojavljanje drobirskih tokov v razredu, kjer je dovzetnost za njihovo pojavljanje zanemarljiva, se pojavlja 0,4 % drobirskih tokov, kar je najverjetneje posledica generaliziranega merila. Kot je razvidno iz iste preglednice, model POVP_100 zelo dobro napoveduje potencialna območja pojavljanja drobirskih tokov, saj se na slabih 15 % območja pojavlja kar 80,7 % drobirskih tokov, na 34 % območja pa kar 98,7 % drobirskih tokov. Slika 5 prikazuje kumulativno porazdelitev celic testnega niza drobirskih tokov (DT (kum %)) ter porazdelitev deleža površine celotnega območja glede na vrednost modela napovedi (A %). Na sliki 5 so označeni tudi razredi dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov (obarvani krogi s številkami) in meje med njimi (CLS). Preglednica 14 prikazuje rezultate testa χ^2 (Davis, 1986), ki statistično potrjuje ustreznost razdelitve modela POVP_100 na šest razredov dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov (χ^2 = 443,068 in $p < 0,000$).

Kljub dejstvu, da se enote, ki so najbolj dovzetne za pojavljanje drobirskih tokov, pojavljajo v različnih delih Slovenije, tako v njenem W in N delu kot tudi v NE delu, je možno zaslediti skupne imenovalce. Poleg sedimentov, ki so že po svoji sestavi sorodni drobirskim tokovom in so značilni za gorate predele N in W Slovenije (morene, pobočni grušči, vršaji), so enote, dovzetne na pojav-



Sl. 5. Kumulativna porazdelitev celic testnega niza drobirskih tokov (DT (kum %)) ter porazdelitev deleža površin, brez območij z naklonom pod 5°, glede na vrednosti modela POVP_100 (A %). Razredi dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov so prikazani z obarvanimi krogi s številčnimi oznakami in meje med njimi z linijami (CLS). Številčne oznake v krogih predstavljajo dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov: 1 – neznatna; 2 – majhna; 3 – srednja; 4 – velika; 5 – zelo velika. Razred 0 je izločen iz prikaza zaradi podrobnejšega prikaza ostalih 5 signifikativnih razredov.

Fig. 5. Cumulative distribution of the debris-flow test sample pixels (DT (kum %)) and distribution of the area (A %) (areas where slope angle is below 5° are excluded) according to values of the POVP_100 model. Debris-flow susceptibility classes are represented with coloured circles and numbers while boundaries between classes are represented with vertical lines (CLS). Values in the circles stand for the debris-flow susceptibility: 1 – insignificant; 2 – low; 3 – medium; 4 – high; 5 – very high. The class 0 (negligible susceptibility) is excluded from the figure due to better representation of other five classes.

Preglednica 14. χ^2 test ustreznosti reklasifikacije modela POVP_100 na 6 razredov. Stolpec »Dejansko (D)« podaja opazovan delež celic testnega niza drobirskih tokov glede na razred dovzetnosti za pojavljanje, stolpec »Pričakovano (P)« pa pričakovan delež celic testnega niza drobirskih tokov glede na površino razreda dovzetnosti za pojavljanje, če bi model povsem naključno podajal verjetnost pojavljanja.

χ^2 = 443,0689	df = 5	p < 0,000000		
Razred	**Dejansko (D)**	**Pričakovano (P)**	**D-P**	**χ^2 = (D-P)²/P**
0	0,3759	27,8358	-27,4599	27,0891
1	0,0000	10,1771	-10,1771	10,1771
2	0,9554	27,8578	-26,9024	25,9798
3	17,9170	19,4799	-1,5629	0,1254
4	43,3986	10,6619	32,7367	100,5158
5	37,3532	3,9876	33,3656	279,1817
Σ	100,0	100,0	0,0	443,0689

Table 14. Chi square (χ^2) test of model POVP_100 classification into 6 classes. Column "Dejansko (D)" represents observed proportion of the test sample pixels in each susceptibility class, column "Pričakovano (P)" represents expexted proportion of the test sample pixels in each susceptibility class, if the distribution would be random.

ljanje drobirskih tokov v goratih predelih, sestavljene iz ploščatih karbonatov z vključki laporja in roženca. Dovzetne na pojavljanje drobirskih tokov v Karavankah in zahodni osrednji Sloveniji so poleg karbonatnih z vključki tudi flišne plasti, plasti glinovca, meljevca, peščenjaka, laporja in tudi piroklastični sedimenti. V NE delu Slovenije, na območjih magmatskih in metamorfnih kompleksov, pa so za pojavljanje drobirskih tokov dovzetni tonalit, blesniki, gnajsi, granit z diabazom in filitoidni skrilavec.

Ker je velika dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji vezana le na manjši del površja, ki znaša po rezultatih izbranega modela okoli 15 % in ker so razmerja med deležem celic testnega niza ter površjem območij, ki so bolj podvržena pojavom drobirskih tokov, najugodnejša za zgornje štiri razrede, ki pokrivajo 20 % površja (glej sliko 3), smo se odločili, da kot referenčni okvir za določitev oziroma izračun razpona napake modela POVP_100 izberemo najboljše (pretreniranje) in najslabše (posplošitev) razmerje (DT/A) med deležem plazov na petini za drobirske tokove najbolj podvrženega ozemlja Slovenije in površjem, ki ga to območje pokriva, torej 20 %. Razmerje na petini ozemlja smo izbrali, da bi v določitev napak vključili tudi mejna območja med razredoma srednja in velika dovzetnost za pojavljanje drobirskih tokov. Vrednosti uteži prostorsko-časovnih dejavnikov so prikazane v preglednici 15.

Razmerje DT/A za pretreniran model znaša 4,26, za posplošen model pa 3,36. Povprečje razmerij za sto najuspešnejših modelov znaša 3,84. Za najboljši model znaša delež celic testnega niza drobirskih tokov 76,23 %, delež natančne površine zgornjih štirih razredov (80 – 100 %) 19,81 %, njuno razmerje pa znaša 3,85, kar je zelo blizu povprečja razmerij za sto najuspešnejših modelov.

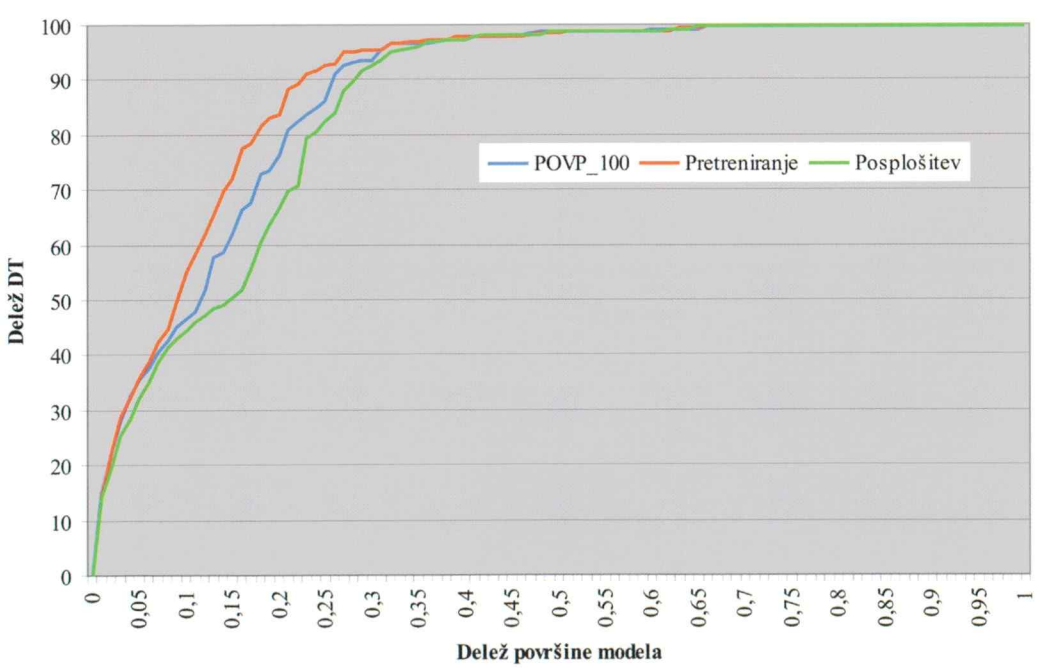
Slika 6 prikazuje kumulativno porazdelitev celic testnega niza drobirskih tokov glede na sto po površini enakih razredov za tri modele, pretreniranje, posplošitev in POVP_100. Iz poteka krivulj je jasno razvidna večja uspešnost pretreniranega modela in slabša uspešnost posplošenega modela od idealnega modela POVP_100. Za primerjavo med kakovostjo modelov smo izbrali nevtralno klasifikacijo, zato smo vse modele razdelili na 100 razredov z enakimi površinami, kar je omogočilo njihovo primerjanje.

Na sliki 7 so prikazane velikosti napake modela POVP_100 oziroma odstopanj vrednosti tega modela od pretreniranega (ERR PR) in od posplošenega (ERR PO) modela. Z linijo je prikazana največja absolutna vrednost napak obeh ekstremov,

Preglednica 15. Vrednosti uteži prostorsko-časovnih dejavnikov za model z najboljšim in najslabšim razmerjem med deležem celic testnega niza drobirskih tokov in natančno površino zgornjih štirih razredov (80–100 %) ter za model POVP_100. Razlaga prostorsko-časovnih dejavnikov (P-Č dejavniki) je podana v preglednici 11.

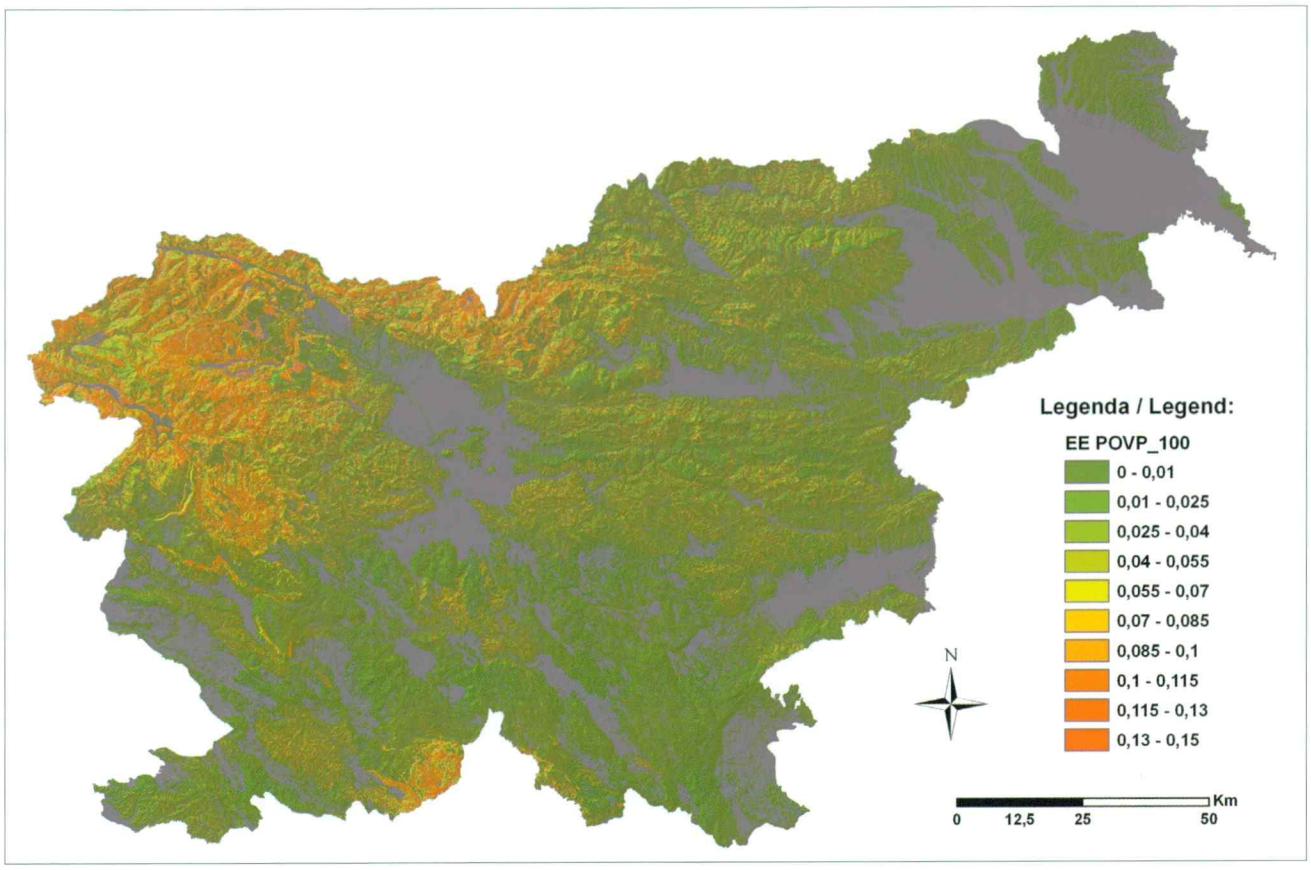
Table 15. Weights values of spatio-temporal factors for models with the best (over fitted model), the worst (generalisation model) DT (test sample pixel proportion in top four classes) over A (exact proportion of the area of top four classes) ratio and for POVP_100 model. Explanation of spatio-temporal factors (P-Č dejavniki) is given in the Table 11.

P-Č dejavniki	LITOTEK	PAD48	NAKL	NMVPAS	EPV100	ODD_PV	KONK	DT (%)	A (%)	DT/A
Pretreniranje	0,200	0,220	0,170	0,080	0,140	0,100	0,090	83,65	19,65	4,26
Posplošitev	0,140	0,220	0,140	0,050	0,140	0,160	0,150	65,73	19,57	3,36
POVP_100	0,189	0,203	0,147	0,054	0,171	0,12	0,116	76,32	19,81	3,85



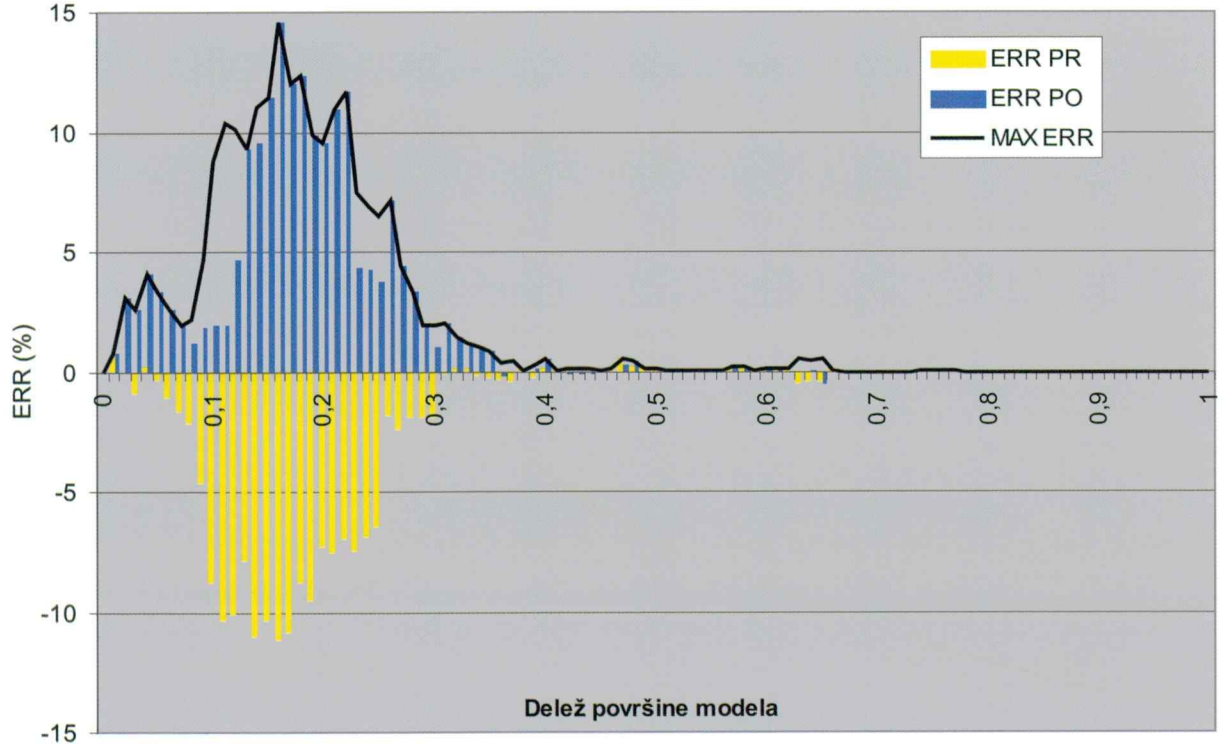
Sl. 6. Kumulativna porazdelitev celic testnega niza drobirskih tokov glede na sto po površini enakih razredov za tri modele, pretreniranje, posplošitev in POVP_100. Iz poteka krivulj je jasno razvidna večja uspešnost pretreniranega modela in slabša uspešnost posplošenega modela od idealnega modela POVP_100.

Fig. 6. Cumulative distribution of the debris-flow test sample pixels according to 100 classes with equal area for three models: over fitting (pretreniranje), generalisation (posplošitev), and POVP_100. The distribution curves indicate that over fitted and generalised models represent higher and lower success rate respectively.



Sl. 7. Velikosti napake modela POVP_100 oziroma odstopanj vrednosti tega modela od pretreniranega (ERR PR) in od posplošenega (ERR PO) modela glede na sto razredov z enakimi površinami. Z linijo je prikazana največja absolutna vrednost napak obeh ekstremnih modelov (MAX ERR).

Fig. 7. Rates of error for the model POVP_100, which are for each of 100 classes with equal area, calculated from the difference between values of POVP_100 and over fitted (ERR_PR) and generalised model (ERR_PO). Black line shows the maximum absolute difference (error) of both extreme models (MAX_ERR).



Sl. 8. Ocenjena napaka modela dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji z imenom POVP_100. Napaka je bila ocenjena na podlagi največjega odstopanja modela POVP_100 od pretreniranega in posplošenega modela.

Fig. 8. Estimated error for the model POPV_100 that shows debris-flow susceptibility for Slovenia. The error was estimated from the maximum difference between values of POVP_100 and over fitted and generalised model.

ki služi za oceno zaupanja v model dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji. Največje napake modela POVP_100, katerih vrednosti znašajo nad 0,1, se pojavljajo v pasu med 79-im in 88-im razredom med stotimi po površini enakimi razredi, na katere je razdeljeno območje analiz. Največja napaka znaša 0,146 in se pojavlja v 85-em razredu, ki je razvrščen v razred velike dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Večna večjih napak sodi v razred velike dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov, manjši pa v razred srednje dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov. Slika 8 podaja prostorski prikaz napake modela POVP_100.

Pregled prostorskega pojavljanja napak modela POVP_100 pokaže, da so območja z večjo napako večinoma vezana na hribovita območja, ki jih tvori skladnat dachsteinski apnenec s prehodi v dolomit, masivni debelozrnati dolomit in apnenec, pobočni grušč ter plasti skrilavega glinovca, meljevca, ploščastega apnenca z roženci, laporja, drobe, peščenjaka, konglomerata, breče in tufa. Na območjih z večjo napako se pojavlja manj padavin in pobočja z nakloni med 15° in 33°.

Zaključki

Drobirski tokovi so kompleksni pojavi, katerih naravo pojavljanja in gibanja je težko napovedovati in modelirati, kar je posledica podvrženosti različnim vplivnim dejavnikom, katerih lastnosti se prostorsko in časovno zelo spreminjajo. Izbrani pristop določitve vpliva prostorsko-časovnih dejavnikov na pojavljanje drobirskih tokov z izračunom linearnega modela napovedi predstavlja zgolj grob približek dejanskemu stanju v naravi. Kljub dejstvu, da iskanje idealnega modela ni nikoli končano, pa je pragmatičen pristop, ki smo ga izbrali za izdelavo modela iz naslova prispevka, enostaven, robusten, hiter in stroškovno smiseln. Izbrana napoved dovzetnosti za pojavljanje drobirskih tokov v Sloveniji v merilu 1 : 250.000 je prva kompleksnejša analiza določitve ogroženost pred drobirskimi tokovi na Slovenskem ozemlju. Omogoča, da za izločena oz. najbolj ogrožena območja Slovenije izvedemo podrobnejše analize na osnovi podrobnega kartiranja terena in vršajev, kar lahko izvedemo z uporabo v tem članku opisanega postopka modeliranja, seveda z drugačnimi utežmi vplivnih dejavnikov.

Zahvale

Pričujoča študija je bila v okviru Ciljnih raziskovalnih projektov (M2-0144 – Ocena ogroženosti zaradi delovanja drobirskih tokov) sofinancirana s strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, Uprave Republike Slovenije za zaščito in reševanje, ki deluje v okviru MORS, in z lastnimi sredstvi Geološkega zavoda Slovenije. Avtorji se zahvaljujejo nosilcu projekta prof. dr. Matjažu Mikošu za kritične pripombe ter vsem sodelavcem, ki so kakor koli pomagali pri izdelavi analiz ali pa so s svojim znanjem in izkušnjami svetovali pri nastanku prispevka.

Literatura

Anderson, S. A. 1995: Analysis of rainfall-induced debris flows. Journal of Hydraulic Engineering, 121: 544–552.

Alzate, A. B. E., Guevara, C. &Valero, J. A. M. 1999: Zonation on a large scale of mass movement hazards, using the GIS. Proceedings of the Nineteenth Annual ESRI User Conference. 1–23.

Archetti, R. & Lamberti, A. 2003: Assessment of Risk due to Debris Flow Events. Natural Hazard Review, 4/3: 115–125.

Arso, 2003: 50-letna povratna doba 48-urnih padavin, obdobje: 1961–2000 (digitalni prostorski podatek), Agencija Republike Slovenije za okolje.

Arso, 2005: Evropsko okoljsko informacijsko in opazovalno omrežje. – Agencija Republike Slovenije za okolje, Ministrstvo za okolje in prostor, Ljubljana. (http://nfp-si.eionet.europa.eu/Dokumenti/GIS/, 2005)

Bardou, E., Niggli, M. & Musy, A. 2003: The role of snow in the generation of debris flow in small watersheds of the European Alps. Geophysical Research Abstracts, 5.

Bardou, E., & Delaloye, R. 2004: Effects of ground freezing and snow avalanche deposits on debris flows in alpine environments. Natural Hazards and Earth System Sciences, 4: 519–530.

Benda, L. E. & Cundy, T. W. 1990. Predicting deposition of debris flows in mountain channels. Canadian Geotechnical Journal, 27: 409–417.

Buser, S.: Geološka karta Slovenije 1 : 250.000 v tisku.

Carson, R. 2002: Take the a-frame: debris flow during 1996 rain-on-snow event, Blue Mountains, Washington. Proceedings of the Geological Society of America Cordilleran Section 98th Annual Meeting, May 13–15, 2002.

Ceriani, M., Crosta, G., Frattini, P. & Quattrini, S. 2000: Evaluation of hydrogeological hazard on alluvial fans. INTERPRAEVENT 2000 Villach, 2: 213–225.

Christensen, M., Bartelt, P. & Gruber, U. 2009: Hazard Mapping and GIS: Simulating Avalanche, Debris Flow and Rock-fall. Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research (http://www.wsl.ch/forschung/forschungsprojekte/rapid_mass_movements/index_EN, 20. 2. 2009)

Committee on Alluvial Fan Flooding, 1996: Alluvial Fan Flooding. Water Science and Technology Board, Commission on Geosciences, Environment, and Resources, National Research Council, National Academy Press, Washington, 1–36.

Cruden, D. M. & Varnes, D. J. 1996: Landslide types and processes. V: Turner A.K.; Shuster R. L. (ur), Landslides: Investigation and Mitigation. Transp Res Board, Spec Rep 247: 36–75.

Dai, F., Lee, C. F. & Wang, S. 1999: Analysis of rainstorm-induced slide-debris flows on natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. Engineering Geology, 51: 279–290.

Davis, J. C. 1986: Statistics and data analysis in geology. John Wiley & Sons (New York) 1–646.

Delmonaco, G., Leoni, G., Margottini, C., Puglisi, C. & Spizzichino, D. 2003: Large scale debris-flow hazard assessment: a geotechnical approach and GIS modelling. Natural Hazards and Earth System Sciences, European Geosciences Union, 3: 443–455.

Di, B. F., Chen, N. S., Cui, P., Li, Z. L., He, Y. P. & Gao, Y. C., 2008: GIS-based risk analyses of debris flow: an application in Sichuan, southwest China. International Journal of Sediment Research, 23/ 2: 138–148.

Dietrich, W. E., & Montgomery, D. E. 1998: Shalstab. A digital terrain model for mappingshallow landslide potential. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement) Technical Report, February 1998, 1–29.

Guinau, M., Vilajosana, I. &Vilaplana, J. M. 2007: Gis-based debris flow source and runout susceptibility assessment from DEM data – a case study in NW Nicaragua. Natural Hazards and Earth System Sciences, 7: 703–716.

Embleton-Hamann, C. 1997: Austria. v: Embleton, C. & Embleton-Hamann, C. (ur.), Geomorphological Hazards of Europe. Developments in Earth Surface Processes (Elsevier) 5: 1–30.

Esri, 2006: ArcGIS Desktop Help. ESRI.

Fannin, R. J. & Rollerson, T. P. 1993. Debris flows: some physical characteristics and behavior. Canadian Geotechnical Journal 30: 71–81.

Fiorillo, F. & Wilson, R. C. 2004: Rainfall induced debris flows in pyroclastic deposits, Campania (southern Italy). Engineering Geology, 75: 263–289.

Fleming, R. W., Ellen, S. D. & Algus, M. A. 1989: Transformation of dilative and contractive landslide debris into debris flow – an example from Marin Country, California. Engineering Geology, 27: 201–223.

GURS 2005: Digitalni model višin – DMV25, 1998-2005 (Digitalni model višin z ločljivostjo celice 25 × 25 m). Geodetska uprava Republike Slovenije, Ljubljana.

Jež, J., Mikoš, M., Trajanova, M., Kumelj, Š. & Bavec, M. 2008: Vršaj Koroška Bela – Rezultat katastrofičnih pobočnih dogodkov. Geologija (Ljubljana) 51/2: 219–227.

Komac, M. 2005: Intenzivne padavine kot sprožilni dejavnik pri pojavljanju plazov v Sloveniji (*Rainstorms as a landslide-triggering factor in Slovenia*). Geologija (Ljubljana) 48/2: 263–279.

Komac, M., Ribičič, M., Šinigoj, J., Krivic, M. & Kumelj, Š. 2005: Analiza pojavljanja plazov v Sloveniji in izdelava karte verjetnosti plazenj : fazno poročilo za leto 2005. Arhiv Geološki zavod Slovenije (Ljubljana): 1–138.

Kowalski, J. & McElwaine, J. 2008: Two-phase debris flow modeling. Geophysical Research Abstracts, Vol. 10 EGU General Assembly 2008, EGU 2008.

Lan, H. X., Zhou, C. H., Wang, L. J., Zhang, H. Y. & Li, R. H. 2004: Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. Engineering Geology, 76: 109–128.

Lin, P. S., Lin, J. Y., Hung J. C. & Yang, M. D. 2002: Assessing debris-flow hazard in a watershed in Taiwan, Engineering Geology, 66: 295–313.

Mainali, A. & Rajaratnam, N. 1994: Hydraulics of debris flows. Journal of Hydraulic Engineering, 120: 104–123.

Marchi, L. & D'Agostino, V. 2001: Estimation of debris-flow magnitude in the eastern Italian Alps: Data collection and analysis. Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science, 26/9: 657–663.

Mazengarb, C. 2004: Map 3, Hobart - Potential Debris- Flow Hazard.Tasmanian Landslide Hazard Series. Mineral Resources Tasmania, Department of Infrastructure Energy and Resources, Hobart.

Melelli, L. & Taramelli, A. 2004: An example of debris-flows hazard modeling using GIS. Natural Hazards and Earth System Sciences, 4: 1–12.

Mergili, M. 2008: r.debrisflow, version 1.3. User's manual and model outline. A model framework for simulating mobilization and movement of debris flow. Institute of Geography, University of Innsbruck, Austria.

Mikoš, M. 2001: Značilnosti drobirskih tokov. Ujma (Ljubljana) 14/15: 295–299.

Miller, D. J. & Burnett, K. M. 2008: A probabilistic model of debris-flow delivery to stream channels, demonstrated for the Coast Range of Oregon, USA. Geomorphology, 94:184–205.

Nakagawa, H., Takahashi, T. & Satofuka, Y. 2000: A debris flow disaster on the fan of the Harihara River, Japan. Proceedings of the 2nd International conference on debris flows hazard mitigation: mechanics, prediction and assessment, Taipei, 16–18 August, Rotterdam, Balkema, edited by Wieczorek and Naeser, 193–201.

Nakagawa, H., Takahashi, T. & Satofuka, Y. 2001: An analysis of the debris flow disaster in the Harihara River basin. In: Particulate Gravity Currents. Spec. Publs. Int. Ass. Sediment., 31: 45–64.

Oldnall, R. 2004: Risk Assessment of Natural Hazards, Munich Re Insurance Company, Auckland, 9 str. (http://www.rmla.org.nz/publications_2004/OldnalPaper.doc, 2. 2. 2009)

Petkovšek, B. 2000/2001: Zemeljski plaz Stože pod Mangartom – Geološke značilnosti plazu. Ujma (Ljubljana) 14/15: 98–101.

Podobnikar, T. & Székely, B. 2008: Poskus analize potencialno nevarnih vršajev z DMR-jem. V: Perko, D. (Ur.), Zorn, M. (Ur.), Razpotnik, N. (Ur.), Čeh, M. (Ur.), Hladnik, D. (Ur.), Krevs, M. (Ur.), Podobnikar, T. (Ur.), Repe, B. (Ur.), Šumrada, R. (ur.). Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007–2008, (GIS v Sloveniji, 9), Ljubljana, Založba ZRC, 73–81.

Poljak, M. 2000: Strukturno-tektonska karta Slovenije, merilo: 1 : 250.000. Arhiv Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.

Pozzoni, M., Ambrosi, C., Salvetti, A., Thüring, M. & Germann-Chiari, C. 2009: Conceptual debris

flow modeling for risk assessment at the municipal scale. SUPSI, Manno. (www.ist.supsi.ch/Content/main/uploaded/img/progetti/dfwalk_big.pdf, 12. 1. 2009)

R2 Resource Consultants, 2005: Upper Nehalem Watershed Analysis. Oregon Department of Forestry (Salem) 1–231.

Ribičič, M. 2002: Inženirska geologija. Skripta. Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, (Ljubljana): 1–30.

Rickenmann, D. & Zimmerman, M. 1993: The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. Geomorphology, 8: 175–189.

Skaberne, D. 2001: Predlog slovenskega izrazoslovja pobočnih premikanj-pobočnega transporta. Geologija (Ljubljana) 44/1: 89–100.

Sodnik, J. & Mikoš, M. 2006: Estimation of magnitudes of debris flows in selected torrential watersheds in Slovenia (*Ocena magnitud drobirskih tokov v izbranih hudourniških območjih v Sloveniji*). Acta geogr. Slov., (Ljubljana) 46/1: 93–123.

Swanson, F. J., Johnson, S. L., Gregory, S. V. & Acker. S. A. 1998. Flood disturbance in a forested mountain landscape. BioScience 48/9: 681–689.

Takahashi, T. 1991: Debris Flow. IAHR/AIRH, Balkema, 1–165.

Toyos, G., Oramas Dorta, D., Oppenheimer, C., Pareschi, M. T., Sulpizio, R. & Zanchetta, G. 2008: GIS-assisted modelling for debris flow hazard assessment based on the events of May 1998 in the area of Sarno, Southern Italy. Part I: Maximum run-out. Earth Surface Processes and Landforms, John Wiley & Sons, Ltd., 33/11: 1693–1708.

Voogd, H. 1983: Multicriteria evaluation for urban and regional planning, Pion Ltd.: London, 119–121.

Wang, C., Esaki, T., Xie, M. & Qiu, C. 2006: Landslide and debris-flow hazard analysis and prediction using GIS in Minamata–Hougawachi area, Japan. Environmental Geology, 51: 91–102.

Wen, B. P. & Aydin, A. 2005: Mechanism of a rainfall-induced slide-debris flow: constraints from microstructure of its slip zone. Engineering Geology, 78: 69–88.

Zhou, G., Esaki, T., Mitani, Y., Xie, M. & Mori, J. 2003: Spatial probabilistic modeling of slope failure using an integrated GIS Monte Carlo simulation approach. Engineering Geology, 68: 373–386.