

# OCENJEVANJE MAGNITUD DROBIRSKIH TOKOV

Jošt Sodnik\*, Matjaž Mikoš\*\*

## Povzetek

Namen raziskave dinamike drobirskih tokov kot posebne oblike masnega gibanja sedimentov po pobočjih ali hudourniških strugah je bil zbrati metode za ocenjevanje ogroženosti z drobirskimi tokovi s posebnim poudarkom na oceni njihove magnitude. Izbrane metode smo razdelili na empirične, morfološke, kombinirane in računalniške metode. Empirične metode so namenjene oceni magnitude drobirskega toka, morfološke metode se delijo na tiste, ki ocenjuje magnitudo, in na tiste, ki so namenjene določevanju nevarnosti delovanja drobirskega toka na hudourniškem vršaju. Kombinirane metode so kombinacija različnih drugih metod. Na podlagi statistične obdelave določijo parametre povodja, ki so odločilni, in tako določijo empirično enačbo za izračun magnitude drobirskega toka. Računalniške metode so računalniški programi, ki upoštevajo tako zalogo erozijskega drobirja v obravnavanem prispevnem območju kot tudi premestitveno zmogljivost hudournika z upoštevanjem odlaganja materiala v strugi hudournika.

## Uvod

V preteklih nekaj letih smo žal tudi v Sloveniji bolje spoznali drobirske tokove. Gre za obliko masnega gibanja sedimentov, ki se lahko razvije na pobočjih ali v strugah hudournikov. Poznavanje njihove dinamike (Mikoš, 2001) omogoča načrtovanje primernih preventivnih ukrepov. Eno najbolj pogostih vprašanj v zvezi z drobirskimi tokovi je vprašanje, kje lahko nastanejo. Ob tem je za načrtovanje ukrepov nujno poznati prostornino (magnitudo) pojava, ki jo lahko pričakujemo. S pomočjo ocenjenih magnitud lahko z modeliranjem gibanja drobirskih tokov ocenimo njihov doseg kakor tudi pretočne hitrosti in globine, ki jih običajno uporabimo pri ocenah ogroženosti. Obširnejše načrtovanje ukrepov za varstvo pred različnimi erozijskimi pojavi mora obravnavati vsak primer posebej, saj ima vsak primer svoje specifične lastnosti, ki lahko bistveno vplivajo na potek možnih dogodkov. Eden od bistvenih podatkov je velikost obravnavanega erozijskega območja. Razmerje med količino erozijskega materiala, ki je na določenem območju na razpolago, in količino materiala, ki se dejansko sproži ob posameznem dogodku, je od primera do primera lahko zelo različno. Vseeno so v preteklosti skušali razviti metode, ki bi bile splošno uporabne za ocenjevanje magnitude drobirskih tokov.

Do danes so številne terenske študije obravnavale geomorfološke procese na hudourniških vršajih. V eni prvih je Melton (1965) predlagal zvezo med naklonom hudourniškega vršaja ( $S$ ) in nekaterimi drugimi parametri:

$$S = a[(H_{\max} - H_{\min})A^{-0,5}]^n, \quad (1)$$

pri čemer sta  $a$  in  $n$  neodvisna koeficienta,  $H_{\max}$  in  $H_{\min}$  sta višina najvišje točke hudourniškega območja in najvišja točka vršaja (km) ter  $A$  je površina hudourniškega območja (km<sup>2</sup>). Izraz  $Mel = (H_{\max} - H_{\min})A^{-0,5}$  se po avtorju imenuje kar Meltonovo število. Ta pristop je osnova za raziskovanje naplavinjskih procesov na vršajih, usmerjeno v

---

\* VGP d.d., Cesta Mirka Vadnova 5, Kranj, [jost.sodnik@vgp-kranj.si](mailto:jost.sodnik@vgp-kranj.si)

\*\* Univerza v Ljubljani, FGG, Oddelek za gradbeništvo, Katedra za splošno hidrotehniko, Jamova 2, Ljubljana, [matjaz.mikos@fgg.uni-lj.si](mailto:matjaz.mikos@fgg.uni-lj.si)

klasifikacijo vršajev na podlagi morfoloških parametrov hudourniških območij in hudourniških vršajev.

V nadaljevanju so predstavljene različne metode za ocenjevanje magnitude drobirskih tokov kot ene od osnov za ocenjevanje ogroženosti s tem pojavom. Metode so razdeljene na empirične, morfološke, kombinirane in računalniške metode. Empirične metode so namenjene oceni magnitude drobirskega toka, morfološke metode se delijo na tiste, ki ocenjuje magnitudo, in na tiste, ki so namenjene določevanju nevarnosti delovanja drobirskega toka na hudourniškem vršaju. Kombinirane metode so kombinacija različnih drugih metod. Na podlagi statistične obdelave določijo odločilne parametre povodja v obliki empirične enačbe za izračun magnitude drobirskega toka. Računalniške metode so računalniški programi, ki upoštevajo zalogo erozijskega drobirja v obravnavanem prispevnem območju in premestitveno zmogljivost hudournika z upoštevanjem odlaganja materiala v strugi hudournika.

### Empirične metode

*Takei (1984)*

Ocene magnitude drobirskih tokov se je treba lotiti tako, da upoštevamo zalogo erozijskega materiala v vsakem hudourniku posebej. Ni sicer nujno, da v vsakem hudourniškem območju pričakujemo nastanek drobirskega toka, vendar je bila velika večina katastrof, ki so se v preteklosti zgodile na Japonskem v manjših hudourniških območjih, posledica nastanka in delovanja drobirskih tokov. Na magnitudo drobirskega toka vpliva veliko število spremenljivk: topografija, geologija, podnebje, vegetacija in mnoge druge. Drobirski tokovi se pojavijo samo ob ekstremni kombinaciji naštetih faktorjev. Tako je iskanje korelacije med posameznimi faktorji prvi korak v smeri iskanja splošnejše rešitve. Takei je z namenom poiskati praktično rešitev za realne probleme upošteval magnitudo drobirskega toka, prispevno območje posameznega hudournika in skupno količino zemeljskih plazov. Upošteval je podatke o 551 tovrstnih dogodkih med letoma 1971 in 1977. Regresijske enačbe in koeficienti korelacije so bili sledeči:

$$V_d = 13600A^{0,61} \dots (\text{m}^3) (r^2 = 0,52) \quad (2)$$

$$V_s = 22800A^{0,59} \dots (\text{m}^3) (r^2 = 0,57) \quad (3)$$

$$V_d = 0,914V_s^{0,838} \dots (\text{m}^3) (r^2 = 0,84), \quad (4)$$

pri čemer je  $A$  površina prispevnega območja posameznega hudournika ( $\text{km}^2$ ),  $V_d$  je prostornina drobirskih tokov ( $\text{m}^3$ ) in  $V_s$  je prostornina zemeljskih plazov ( $\text{m}^3$ ). Ob zelo obsežnem drobirskem toku lahko struga postane del toka, saj je erozijska moč toka takrat zelo velika. Ob manj intenzivnih pojavih pa se lahko zgodi, da material prispeva le del prispevnega območja. Raziskave so pokazale tudi, da ponavadi okrog 40 % sproženega erozijskega materiala zaostane v strugi hudournika, medtem ko ostalih 60 % drobirskega materiala konča izven struge, ponavadi v ravninskem delu na koncu hudourniške struge.

*Kronfellner-Krauss (1984)*

Avtor je podal enostavni izraz za izračun magnitude drobirskega toka za posamezen dogodek in ob tem uporabil značilnosti hudourniškega območja:

$$M = K * A_d * S_c \dots (\text{m}^3), \quad (5)$$

pri čemer je  $K$  brezdimenzijski koeficient lastnosti hudournika (-),  $A_d$  je površina hudourniškega območja ( $\text{km}^2$ ) in  $S_c$  je povprečen padec hudourniške struge (%), ki se lahko določi iz topografskih kart 1 : 25.000 ali 1 : 50.000. Majhna in strma hudourniška

območja imajo vrednosti  $K$  okoli 1.500, medtem ko imajo večja hudourniška območja vrednost  $K$  okoli 500. Avtor je analiziral 1.420 primerov visokih voda v Avstriji v 11 letih. Na podlagi te analize je avtor razdelil hudourniška območja v Avstriji na različne cone:

$$K = 1750 / e^{0,018A_d} - \text{avstrijsko visokogorje} \quad (6)$$

$$K = 1150 / e^{0,014A_d} - \text{hudourniki v Apneniških Alpah z veliko materiala} \quad (7)$$

$$K = 540 / e^{0,008A_d} - \text{ostali hudourniki v Apneniških Alpah} \quad (8)$$

$$K = 254 / e^{0,0016A_d} - \text{hudourniki v predalpskem svetu} \quad (9)$$

Določitev izrazov za vrednost  $K$  je bila opravljena na osnovi velikosti hudourniškega območja in njegovih geomorfoloških značilnosti. Od naklona hudourniškega območja pa je odvisno, kakšen del razpoložljivega erozijskega materiala se bo mobiliziral. Kakšen potencial materiala ima posamezen hudournik, je treba preiskati na terenu.

### *Marchi in D'Agostino (2002)*

Raziskava je bila opravljena na podlagi terenskih podatkov in podatkov iz raziskovalne literature za 127 hudourniških območij v italijanskih Alpah. Podatki so bili uporabljeni za razvoj in testiranje različnih pristopov: poleg empiričnega pristopa s pomočjo regresijskih enačb tudi geomorfološkega pristopa, opisanega kasneje v prispevku, in tudi pristopa z verjetnostno analizo, ki pa v tem prispevku ni opisan.

Empirični pristop k problematiki je obravnaval količino drobirskih tokov  $M$  v odvisnosti od velikosti prispevnega območja  $A$ . Večina analiziranih dogodkov se je uvrstila v območje, omejeno zgoraj z enačbo  $M = 70.000 A$  in spodaj z enačbo  $M = 1.000 A^{0,3}$ . Dogodki z manjšo magnitudo kot  $1.000 \text{ m}^3$  se pojavljajo zelo redko.

Avtorja sta začela z izrazom, ki temelji na podatkih iz 62 hudourniških območij v vzhodnih Alpah (D'Agostino, 1996; D'Agostino et al., 1996) v obliki regresijske enačbe, ki oceni magnitudo drobirskega toka ( $\text{m}^3$ ) z uporabo neodvisnih spremenljivk:

$$M = 45000 A^{0,9} S^{1,5} GI \dots (\text{m}^3), \quad (10)$$

pri čemer je  $A$  ( $\text{km}^2$ ) velikost hudourniškega območja,  $S$  ( $\text{m/m}$ ) je povprečni padec hudourniške struge in  $GI$  je brezdimenzijski geološki indeks, prikazan v preglednici 1.

Preglednica 1. Vrednosti geološkega indeksa za različne kamnine (Marchi in D'Agostino 2002).

Vrsta kamnine	Geološki indeks
Kvartarne naplavine	5
Skrilavci in filiti	4
Laporji, laporni apnenci in meljevci	3
Vulkanske kamnine	2
Dolomiti in apnenci	1
Masivne magmatske in metamorfne kamnine	0
Močno razpokane in delno porušene kamnine	3–5

Magnitudo drobirskih tokov, izračunane z enačbo (10), niso povezane s povratno dobo. Ker se enačba bolje prilagaja drobirskim tokovom velikih dimenzij, obstaja možnost, da so manjši dogodki podcenjeni.

Zato so iz razpoložljivih podatkov na podlagi razmerij  $M/A$  in  $M/L$  ( $L$  je dolžina hudourniške struge) izločili primere manjših drobirskih tokov in iz preostalih podatkov enačbo (10) nadomestili z regresijsko enačbo:

$$M = 18000 A^{1,16} S^{1,30} GI \dots (\text{m}^3) (r^2 = 0,759). \quad (11)$$

Če so zanemarili vpliv geološkega indeksa, so dobili izraz:

$$M = 65000 A^{1.35} S^{1.7} \dots (\text{m}^3) \quad (r^2 = 0,743). \quad (12)$$

Ker je velikost hudourniškega območja povezana s prostornino vode, ki z njega lahko odteče  $V_r$  ( $\text{m}^3$ ), so zapisali izraz:

$$M = V_r (\alpha S^\beta) \dots (\text{m}^3), \quad (13)$$

kjer sta  $\alpha$  in  $\beta$  kalibracijska koeficienta, prostornino odtoka  $V_r$  pa so izrazili iz velikosti hudourniškega območja  $A$  na podlagi naslednje hipoteze:

$$V_r = T_c * Q_p \dots (\text{m}^3), \quad (14)$$

kjer je  $Q_p$  maksimalni odtok:

$$Q_p = A \left( 2,35 \frac{500}{A+125} + 0,5 \right) \dots (\text{m}^3/\text{s}) \quad (15)$$

in  $T_c$  je čas koncentracije:

$$T_c = 3600 (0,675 A^{0,5}) \dots (\text{s}). \quad (16)$$

Po izračunu  $V_r$  so ocenili koeficienta  $\alpha$  in  $\beta$  ter ugotovili, da je koeficient  $\beta$  skoraj konstanten ( $\approx 2$ ), koeficient  $\alpha$  pa se je spreminjal od 1,6 do 2,9 (višja vrednost ustreza večjim drobirskim tokovom). Na podlagi teh ocen je bila razvita enačba:

$$C_v = 2,9 S^2 \dots (-), \quad (17)$$

pri čemer je  $C_v = M/V_r$  in predstavlja razmerje med prostornino drobirskega toka  $M$  in prostornino odtoka vode  $V_r$ .

## Morfološke metode

*Jackson et al. (1987)*

Z drobirskimi tokovi so najbolj ogrožena mesta na vršajih, ki so večinoma sestavljeni iz odkladnin drobirskih tokov. Terenska raziskava različnih vršajev je pokazala na zvezni prehod med aluvialnimi vršaji, ki so povsem brez ali le deloma sestavljeni iz odkladnin drobirskih tokov, in drobirskimi vršaji, ki so v celoti sestavljeni iz odkladnin drobirskih tokov. Vzrok te razlike je lahko manjši naklon območja ali drugačna geološka sestava območja, ki zmanjšuje površinski odtok. Torej se lahko pri ocenjevanju ogroženosti izločijo aluvialni vršaji, če jih znamo ločiti od drobirskih vršajev na osnovi morfometričnih raziskav vršajev in parametrov hudourniškega območja. Metoda, s katero lahko drobirske vršaje določimo s pomočjo kart ali aerofoto posnetkov, omogoča uspešnejše ocenjevanje preteklih drobirskih tokov in volumnov vršajev.

Raziskave so potekale na treh različnih območjih, ki so reprezentativna za celotno območje ameriškega Skalnega gorovja. Vršaji so bili razdeljeni na drobirske in aluvialne vršaje na podlagi treh morfoloških in sedimentoloških kriterijev:

- sledovi drobirskih tokov (slaba stratifikacija kamnin, slaba raznolikost in klastične kamnine),
- prisotnost nanosov drobirskega toka in drobirske kamnine na površju vršaja,
- prisotnost skal premera  $> 1$  m.

Vršaji so bili označeni kot popolnoma aluvialni, če niso ustrezali kriterijema 2 in 3 in je denudacija pokazala na prisotnost rečnih sedimentov, na zmerno razvrščanje in na zaobljene klastične kamnine, ki nastajajo iz sedimentov.

Vsakemu vršaju na terenu in iz topografskih kart merila 1 : 50.000 določimo še štiri parametre:

- površina vršaja (celotna površina posameznega vršaja),
- naklon vršaja (povprečen padec terena na posameznem vršaju od vrha do dna),

- prispevno območje (celotna površina hudourniškega območja v zaledju vršaja),
- višina prispevnega območja (višinska razlika med najvišjo točko v hudourniškem območju in najvišjo točko vršaja).

S statističnimi analizami so dokazali, da je površina vršaja manj pomemben parameter zaradi možnega bočnega erodiranja materiala. Primerjava naklona vršaja s površino in višino hudourniškega območja se je izkazala kot najboljša metoda za razlikovanje med aluvialnimi in drobirskimi vršaji. Hudourniška območja, kjer se pojavljajo drobirski tokovi, so majhna in strma, vršaj pa je prav tako strm. Za razliko od teh so ostala hudourniška območja ponavadi manj strma, z večjimi vodotoki in manj strmimi vršaji.

Aluvialni in drobirski vršaji se lahko razvrstijo v dve ločeni skupini v odvisnosti od Meltonovega števila in od naklona vršaja. Večina aluvialnih vršajev je imela naklon manjši od  $2,5^\circ$  in Meltonovo število manjše od 0,3. Nasprotno so imeli drobirski vršaji naklon večji od  $4^\circ$  in Meltonovo število večje od 0,25–0,3. Med navedenimi vrednostmi leži prehodno območje med aluvialnimi in drobirskimi vršaji. Seveda so v naravi tudi izjeme, ki ustrezajo pogojem ene skupine, uvrščajo pa v drugo skupino. Pri takih primerih je potrebna pozornost in podrobnejša raziskava, na podlagi katere lahko vršaj ustrezno razvrstimo.

Hooke je leta 1967 z modelnimi študijami odkril, da imajo vršaji, ki jih tvorijo drobirski tokovi, naklon od  $4^\circ$  do  $8^\circ$ . Torej je naklon od  $3^\circ$  do  $4^\circ$  meja med vršaji, na katerih so prisotne aktivnosti drobirskih tokov, in tistimi vršaji, kjer tega ni. To so potrdile tudi druge študije.

Naklon vršaja je premosorazmeren naklonu pobočij v hudourniškem območju. Izkazalo se je, da hudourniška območja z Meltonovim številom nad določeno mejo (0,25–0,30) vsebujejo pobočja in struge z večjim padcem, kot je nujen za nastanek in potovanje drobirskega toka do začetka vršaja. Čeprav se drobirski tokovi pojavljajo tudi na območjih z manjšim Meltonovim številom, kot je mejna vrednost (0,25–0,30), so drobirski tokovi možni, a se odložijo kot hudourniške odkladnine v delu nad vršajem, ki ga ne dosežejo.

Na podlagi omenjenih raziskav lahko zaključimo:

- Naklon vršaja in Meltonovo število je mogoče uporabiti za razločevanje med aluvialnimi in drobirskimi vršaji.
- Drobirski tokovi ogrožajo vršaje, če njihov naklon presega  $4^\circ$  in je Meltonovo število hudourniškega območja večje od mejne vrednosti (0,25–0,30).
- V primerih, kjer imamo samo Meltonovo število, naklona vršaja pa ne poznamo (to se zgodi pri določanju podatkov iz topografskih kart), se lahko ogroženost določi tudi samo s pomočjo Meltonovega števila. Mejna vrednost za tako določitev je  $Mel = 0,25$ .

V zelo redkih primerih se ta ocena izkaže za napačno.

Modeliranje drobirskih tokov je potrdilo, da je ta morfološka metoda za določanje ogroženosti vršajev široko uporabna za strma hudourniška območja na neledeniških območjih. Na ledeniških območjih morfometrična metoda za ocenjevanje ogroženosti ni primerna.

*Marchi et al. (1993)*

Metoda je bila razvita z analizo 58 hudourniških vršajev v goratem območju SV Italije v različnih litoloških razmerah. Analiza vršajev se je začela z analizo aerofoto posnetkov, ki so jih dopolnjevali terenski ogledi. Morfometrični parametri vršajev in hudourniških območij v njihovem zaledju so bili ocenjeni s pomočjo topografskih kart merila 1 : 10.000 in 1 : 25.000. Avtorji so določili naslednje parametre:

- $A$  ( $\text{km}^2$ ); površina prispevnega območja,
- $H_{max}$  (km); višina najvišje točke v prispevnem območju,
- $H_{min}$  (km); višina najnižje točke v prispevnem območju,

- $I_c$  (%); povprečni padec glavne struge,
- $A_c$  (km<sup>2</sup>); površina posameznega vršaja,
- $S_b$  (°); povprečen naklon površja vršaja od njegovega vrha do dna.

Vršaje so razdelili v tri skupine: drobirski vršaji, popolnoma aluvialni vršaji, mešani vršaji. Drobirske vršaje so določili na podlagi naslednjih kriterijev:

- prisotnost naplavin in grobih usedlin na bregovih struge, ostanki grobih naplavin zunaj struge, ki so lahko poraščeni tudi z drevesi – to kaže na delovanje drobirskih tokov v preteklosti,
- prisotnost velikih balvanov na površju vršaja,
- neslojevito in slabo sortirani sedimenti, včasih sortirani v obratni smeri.

Popolnoma aluvialen vršaj lahko določimo, če ne ustreza prvima dvema kriterijema, in so opazne slojevite in lepo sortirane naplavine. Na mešanih vršajih pa geomorfolški in sedimentološki kriteriji kažejo na fluvialno zgradbo, vendar je na nekaterih mestih opaziti sledove drobirskih tokov, ki se lahko pojavijo zelo redko.

Razlika med Meltonovimi števili in nakloni vršaja pri različnih primerih je bila raziskana s pomočjo statističnih analiz. Da bi zagotovili ustreznost preiskave, so bili upoštevani le drobirski vršaji. Meltonovo število za mešane vršaje ime vrednosti od 0,25–0,30 do 0,45–0,50. Naklon mešanih vršajev je večinoma takšen kot pri drobirskih vršajih. Zato je pri gradnji (naselja, premostitve, urejanje hudournikov) na mešanih vršajih treba upoštevati možnost nastopa drobirskih tokov. Pri določanju vrste vršaja je pomembno, da se loči vršaje, kjer bistvene procese predstavljajo hiperkoncentrirani tokovi, od tistih, kjer so pogosti drobirski tokovi in kjer fluvialni procesi nimajo pomembne vloge. V študiji je bila tudi izključena možnost pojava drobirskega toka na hudourniških območjih, večjih od 20 do 30 km<sup>2</sup>.

#### *Marchi in D'Agostino (2002)*

Ta metoda za ocenjevanje magnitude temelji na oceni količin sedimentov, ki se nahajajo vzdolž struge. Struge so raziskane na podlagi terenskih raziskav in na podlagi aerofoto posnetkov območij. Seštevek teh količin vzdolž struge je končna količina materiala v drobirskem toku.

Tovrstne metode so samo približne in so pogosto preveč subjektivne. Erozijska žarišča lahko določimo precej natančno, medtem ko globina erozije in debelina bregov struge ostajajo pogosto le približno ocenjene spremenljivke. Mnoge spremenljivke pogosto tudi zanemarimo. Zaloge materiala v strugi in na bregovih so največkrat izražene kot »specifični prispevek na enoto dolžine struge« (orig. ang. debris yield rate) (m<sup>3</sup>/m).

Avtorji so te ocene razdelili na tri vrste scenarijev: 70–100, 180–400 in 280–600 m<sup>3</sup>/m'. Srednje vrednosti so količinsko primerljive z dogodki v preteklosti. Najslabši scenarij pa bi bil možen ob sočasni veliki nestabilnosti zemljine in katastrofalni količini padavin.

Po pregledu podatkov za vzhodne italijanske Alpe je bilo ugotovljeno naslednje. Če se analizira pogostost posameznih dogodkov, se ugotovi, da povprečen prispevek na enoto struge znaša okrog 10 m<sup>3</sup>/m'. V zelo redkih primerih ta vrednost preseže 50 m<sup>3</sup>/m'. Pojavi se samo v izredno nestabilnih razmerah.

#### *Jakob (2005)*

Metoda določa na podlagi vnaprej določenih kriterijev razvrstitev drobirskih tokov v 10 velikostnih razredov. Celotna prostornina drobirskega toka ( $V$ ) ne zadošča za oceno nevarnosti. Zato sta pomembna parametra še maksimalni pretok ( $Q_p$ ) in površina območja, ki ga bo drobirski tok najverjetneje prekril ( $B$ ).

Prostornina drobirskega toka je parameter, uporaben za dimenzioniranje pregrad (razbijačev drobirskega toka), ki zaustavijo ali vsaj delno ustavijo drobirski tok, preden doseže območja, kjer bi bile posledice katastrofalne. Prav tako je to pomemben parameter za določanje območja dosega in površine območja, ki ga prekrije drobirski tok. Ta parameter je pomemben del vseh modelov. Prostornina tudi neposredno vpliva na nevarnost, ki jo drobirski tok predstavlja, in je veliko bolj uporaben parameter kot na primer masa odloženega drobirskega materiala. Celotna prostornina drobirskega toka je določena kot prostornina materiala, ki se je transportiral na območje pod vrhom vršaja. Različni avtorji podajajo enačbe možnih maksimalnih pretokov  $Q_p$  za blatne ali vulkanske drobirske tokove s pripadajočimi prostorninami drobirskega toka  $V$  (preglednica 2).

Preglednica 2. Zveza med  $Q_p$  in  $V$ , kakor jo predlagajo različni avtorji (Jakob 2005).

Enačba	Avtor
$Q_p = 0,135V^{0,78}$ (skalnat drobirski tok)	Mizuyama et al. (1992)
$Q_p = 0,019V^{0,79}$ (blatni drobirski tok)	Mizuyama et al. (1992)
$Q_p = 0,006V^{0,83}$ (vulkanski drobirski tok)	Jitousono et al. (1996)
$Q_p = 0,04V^{0,90}$ (skalnat drobirski tok)	Bovis in Jakob (1999)
$Q_p = 0,003V^{1,01}$ (vulkanski drobirski tok)	Bovis in Jakob (1999)
$Q_p = 0,001V^{0,82}$ (vulkanski drobirski tok)	Jitousono et al. (1996)
$Q_p = 0,1V^{0,83}$ (skalnat drobirski tok)	Rickenmann (1999)

Območje, ki ga drobirski tok poplavi, je vključeno v obravnavo zato, ker predstavlja parameter, ki omogoča oceno možnih posledic. Nekdo za načrtovanje nekega naselja rabi podatek o površini, ki jo bo drobirski tok poplaval, nekdo drug pa ta podatek rabi za načrtovanje berm za preusmerjanje drobirskega toka. Površina  $B$  ( $m^2$ ) se za blatne (večinoma vulkanske kamnine) in skalnate drobirske tokove razlikuje, saj se blatni drobirski tok razlije na precej večjo površino. Enačba za blatne drobirske tokove v vulkanskih kamninah (Iverson et al. 1998) je:

$$B_V = 200V^{2/3} \quad (18)$$

in za skalnate drobirske tokove (Griswold 2004):

$$B_H = 20V^{2/3} \quad (19)$$

V preglednici 3 so navedeni mejni parametri za posamezne razrede drobirskih tokov. Preglednica 4 opisuje možne posledice drobirskih tokov posameznih razredov. Pri opisovanju razredov je treba poudariti, da je upoštevana prostornina drobirskega toka, mišljena kot prostornina materiala, ki se odloži na ogroženem območju – mejo ponavadi predstavlja vrh vršaja. Maksimalni pretok je računat na začetku vršaja, območje poplavljenost z drobirskim tokom pa je merjeno na vršaju.

Pozornost je nujna pri razločevanju med zrnastim in blatnim drobirskim tokom za velikosti večje od  $10.000 m^3$  (razreda 4 in 5). Dokazano je bilo (Rickenmann, 1999), da lahko nekateri zrnasti in blatni drobirski tokovi menjavajo razreda 4 in 5. Zato je treba lokalno določiti skupno prostornino, maksimalni pretok in območje, prekrito z drobirskim tokom, in tako natančneje določiti velikostni razred, v katerega določeni drobirski tok spada.

Preglednica 3. Parametri posameznih velikostnih razredov:  $V$  je celotna prostornina,  $Q_b$  in  $Q_v$  sta maksimalni odtok za skalnate in za vulkaninske drobirske tokove,  $B_b$  in  $B_v$  pa sta poplavljeni območji za ti dve vrsti drobirskih tokov. Znak N/A pomeni, da se drobirski tok v taki velikosti še ni pojavil oziroma dogodek še ni nikjer zabeležen (Jakob 2005).

razred	$V$ ( $m^3$ )	$Q_b$ ( $m^3/s$ )	$Q_v$ ( $m^3/s$ )	$B_b$ ( $m^2$ )	$B_v$ ( $m^2$ )
1	$< 10^2$	$< 5$	$< 1$	$< 4 \times 10^2$	$< 4 \times 10^3$
2	$10^2 - 10^3$	5–30	1–3	$4 \times 10^2 - 2 \times 10^3$	$4 \times 10^3 - 2 \times 10^4$
3	$10^3 - 10^4$	30–200	3–30	$2 \times 10^3 - 9 \times 10^3$	$2 \times 10^4 - 9 \times 10^4$
4	$10^4 - 10^5$	200–1.500	30–300	$9 \times 10^3 - 4 \times 10^4$	$9 \times 10^4 - 4 \times 10^5$
5	$10^5 - 10^6$	1.500–12.000	$300 - 3 \times 10^3$	$4 \times 10^4 - 2 \times 10^5$	$4 \times 10^5 - 2 \times 10^6$
6	$10^5 - 10^6$	N/A	$3 \times 10^3 - 3 \times 10^4$	$> 2 \times 10^5$	$2 \times 10^6 - 3 \times 10^7$
7	$10^6 - 10^7$	N/A	$3 \times 10^4 - 3 \times 10^5$	N/A	$3 \times 10^7 - 3 \times 10^8$
8	$10^7 - 10^8$	N/A	$3 \times 10^5 - 3 \times 10^6$	N/A	$3 \times 10^8 - 3 \times 10^9$
9	$10^8 - 10^9$	N/A	$3 \times 10^6 - 3 \times 10^7$	N/A	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{10}$
10	$> 10^9$	N/A	$3 \times 10^7 - 3 \times 10^8$	N/A	$> 3 \times 10^{10}$

Preglednica 4. Posledice drobirskih tokov posameznih velikostnih razredov (Jakob 2005).

Velikostni razred	Opis možnih posledic
1	Majhna lokalna škoda, poškodbe manjših objektov
2	Zasuje avtomobile, lomi drevje, uniči majhne lesene objekte, iztiri vlak
3	Uniči večje objekte, poškoduje AB stebre mostov, blokira ceste, cevovode
4	Uniči dele vasi, uniči dele infrastrukture, mostov, zajezi potoke
5	Uniči dele manjšega mesta, uniči gozdove do $2 \text{ km}^2$ , zajezi potoke in manjše reke
6	Uniči cela manjša mesta, zabriše cel vršaj ali dolino do več kot $10 \text{ km}^2$ , zajezi reke
7	Uniči dele večjih mest, zabriše doline do nekaj $10 \text{ km}^2$ , zajezi večje reke
8	Uniči večja mesta, zasuje doline in vršaje do velikosti $100 \text{ km}^2$ , zajezi veletoke
9	Obsežno in popolno uničenje na območju, večjem kot $100 \text{ km}^2$
10	Obsežno in popolno uničenje na območju, večjem kot $100 \text{ km}^2$

Za razrede 6 do 10 velja, da prekrijejo celotne doline ali predgorja, velikosti se nanašajo na celotno prostornino drobirskega materiala od točke sprožitve, maksimalni pretok je računani kjerkoli na transportni poti, prekrito območje pa je celotno območje od točke sprožitve. Opis možnih posledic je ocenjen s pomočjo literature.

Drobirski tokovi **razreda 1** ( $10$  do  $100 \text{ m}^3$ ) se pojavljajo v manjših strugah in ponavadi med potovanjem poberejo manjši material. Sprožijo jih ponavadi manjši plazovi drobirja ali skalni podori. Manjša količina materiala, vode, hitro dreniranje in visoka prepustnost ter majhen padec struge povzročijo zgodnje odlaganje materiala. Drobirski tokovi obsegajo do  $100 \text{ m}^3$ , s pretokom do  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  in površino, ki jo preplavijo do  $4.000 \text{ m}^2$ ; večjo škodo lahko povzročijo le v primeru, če je objekt postavljen na vrhu vršaja, kjer ima drobirski tok še dokaj veliko hitrost in vsebuje tudi večje skale. Nižjega razreda, kot je razred 1, ni, saj drobirski tokovi manjši od  $10 \text{ m}^3$  nimajo nobenega vpliva in zato pogosto niti niso zanimivi za obravnavo.



Drobirski tokovi **razreda 2** (od 100 do 1.000 m<sup>3</sup>), se ponavadi pojavljajo na manjših potokih, ki imajo pogosto, ni pa nujno, omejeno količino erozijskega materiala. Drobirski tokovi na območjih z omejeno količino erozijskega materiala imajo med dvema dogodkoma določeno obdobje za ponovno kopičenje materiala. Na območjih, kjer je materiala neomejeno, so edini faktor sprožitve hidrološki pogoji. Drobirski tokovi z maksimalnim pretokom do 30 m<sup>3</sup>/s (razred 2) lahko poškodujejo objekte grajene iz lesa na površini 20.000 m<sup>2</sup>. Na nekem večjem območju lahko velika količina padavin povzroči sprožitev večjega števila drobirskih tokov razreda 2 in 3, ki se združujejo v drobirske tokove višjih razredov. Drobirskih tokov razreda 1 in 2 pogosto ni zabeleženih v literaturi, ker ne povzročajo velike gmotne škode. V ta razred se uvrščajo drobirski tokovi, ki so se v letu 2002 prožili pod skalnim podorom Strug in so potovali po strugi potoka Brusnik skozi vas Koseč.

**Razred 3** (10<sup>3</sup> do 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>) je značilna velikost drobirskih tokov, ki se pojavljajo z 10-letno povratno dobo v nevulkanskih hudourniških območjih, kjer je le omejena količina erozijskega materiala, ali s krajšo povratno dobo, če je v območje praktično neomejena količina erozijskega materiala. Drobirski tokovi tega razreda imajo velik uničujoč potencial z maksimalnimi pretoki do 200 m<sup>3</sup>/s in s preplavljeno površino do 90.000 m<sup>2</sup>. Take drobirske tokove je težko napovedati, saj imajo v manjših območjih (< 5 km<sup>2</sup>) dolgo povratno dobo in so zato vse sledi prejšnjega dogodka že zakrite z vegetacijo.

Drobirski tokovi **razreda 4** (10<sup>4</sup> do 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>) se lahko pojavijo v podobnih hudourniških območjih kot drobirski tokovi razreda 3, le z veliko daljšo povratno dobo. Ta znaša več sto let za območja z omejeno količino erozijskega materiala. Njihovo možnost lahko napovedo samo strokovnjaki. Za območja z omejeno količino erozijskega drobirja in s površino do 5 km<sup>2</sup> je zgornja meja razreda 4 tista velikost, ki je dosežena šele s povratno dobo več tisoč let.

Drobirski tokovi **razreda 5** (10<sup>5</sup> do 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) se pojavljajo na vulkanskih območjih ali na območjih z obilno količino erozijskega drobirja. Vulkanski drobirski tokovi z visoko vsebnostjo gline in z neizrazitim skalnatim čelom so veliko bolj tekoči kot skalnati drobirski tokovi z gruščnato osnovo. In prav ta značilnost povzroča, da vulkanski drobirski tokovi dosežejo velike razdalje, kjer povzročajo škodo. Skalnati drobirski tokovi tega obsega so zelo redki in dokaz za njih so pogosto le analize sedimentov iz globokih jarkov na območju odlaganja. Zaradi velikega pretoka (do 12.000 m<sup>3</sup>/s) in obširnega območja odlaganja (do 2 km<sup>2</sup>) predstavljajo drobirski tokovi tega razreda veliko nevarnost za naselja in ostalo infrastrukturo na takem območju.

Drobirski tokovi **razreda 6** s prostornino od 10<sup>6</sup> do 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup> in maksimalnim pretokom do 30.000 m<sup>3</sup>/s, ki lahko preplavijo površino do 30 km<sup>2</sup>, se ponavadi pojavijo na vulkanih, kjer jih sproži porušitev določenega območja, topljenje snega ali izbruh vode. Drobirski tokovi tega razreda so v zadnjih sto letih povzročili deset tisoče smrtnih žrtev po vsem svetu. Razred 6 je prav tako najvišji razred za skalnate drobirske tokove, saj so vsi znani večji drobirski tokovi vulkanski. V ta razred lahko uvrstimo drobirski tok s plazuo Stovže, ki je novembra 2000 prizadel Log pod Mangartom.

Drobirski tok **razreda 7** s prostornino 1,8x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> je bil zabeležen v Nikaragvi leta 1998. Drobirski tok **razreda 8** je bil zabeležen na gori St. Helen leta 1980. Prostornina je bila 1,3x10<sup>7</sup>, maksimalni pretok pa je bil 68.000 m<sup>3</sup>/s. Na gori St. Helen se je sprožil tudi drobirski tok **razreda 9** s prostornino 1–2x10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>. Primer drobirskega toka **razreda 10** pa je dogodek na Mount Rainier s prostornino 3–4 km<sup>3</sup>. Dejstvo je, da lahko drobirski tokovi razredov 7 do 10 brez opozorila zahtevajo od 1.000 do 100.000 žrtev ter lokalne demografske spremembe na prizadetem območju z dolgotrajnimi socioekonomskimi posledicami.

## Kombinirane metode

*Ceriani et al. (2000)*

Obravnavano območje je bilo izbrano na območju Lombardije. Izbrana so bila tri območja, v katerih so se v preteklosti že zgodili različni meteorološki dogodki, ki so povzročili poplavljanje. Izbranih je bilo 97 vršajev. Razdeljeni so bili v 4 skupine glede na geografsko lego.

Uporabljena metoda je bila določena glede na njen namen, ki je določitev glavnega procesa na določenem vršaju, določitev stopnje ogroženosti, omejitev območij z različno stopnjo ogroženosti in predstavitev empiričnih enačb za določitev maksimalne količine materiala v enem dogodku.

Terenske raziskave so bile opravljene za določanje parametrov na terenu in preverjanje tistih, ki so bili določeni s pomočjo aerofoto posnetkov in zgodovinskih zapisov.

Raziskave na prispevnem območju so omogočile oceno količine drobirja na hudourniškem območju in na robovih dolin, oceno magnitude preteklih dogodkov in oceno delovanja preteklih ukrepov za stabilizacijo dna vodotokov. Na podlagi teh podatkov je bila za vsak vršaj možna ocena maksimalne možne količine materiala v enem dogodku.

Iz poznavanja morfologije, preteklih dogodkov in poznavanja lastnosti prispevnega območja je bilo možno določiti prevladujoč proces na posameznem vršaju: rečno naplavljanje, nanašanje drobirja ali drobirski tok.

Morfometrični podatki o vršajih in prispevnih območjih so bili dopolnjeni z uporabo geografskega informacijskega sistema in topografskih kart merila 1 : 10.000. Razdelitev vršajev in hudourniških območij je bila opravljena na podlagi terenskih raziskav, topografskih kart in aerofoto posnetkov. Enake osnove so uporabili za določitev nekaterih novih parametrov. Prvi izmed njih je geološki indeks ( $I_G$ ), ki v obravnavo vnaša vpliv različne litološke sestave zaledja.

Preglednica 5. Geološki indeks za posamezne litološke skupine (Ceriani et al. 2000).

litologija	vrednost
ledeniške, aluvialne in pobočne usedline	5
metamorfne kamnine: gnajs, filit	4
lapor, skrilavec	3
vulkanske kamnine (lava, tuf, breča)	2
apnenčaste in magmatske (granit, porfir, diorit)	1

Za določitev geološkega indeksa je bila predlagana naslednja enačba:

$$I_G = \sum_i a_i (\text{vrednost}_i * W_i) / A_b, \quad (20)$$

pri čemer je  $a_i$  površina litologije  $i$  v določenem povodju,  $W$  je indeks preperevanja in razpokanosti (0,1–1) in  $A_b$  je celotna površina prispevnega območja. Zaradi realnosti je vrednost geološkega indeksa tako za apnenčaste kot tudi za magmatske kamnine enaka 1, maksimalna vrednost indeksa pa je za razne usedline enaka 5 (preglednica 5).

Zaradi zaznane nestabilnosti in prisotnosti erozijskih procesov na obravnavanih hudourniških območjih so avtorji predlagi še dva dodatna parametra in sicer indeks erozije ( $I_E$ ) in indeks plazljivosti ( $I_F$ ) (preglednica 6).

Preglednica 6. Erozijski indeks in indeks plazljivosti za različne razmere na prispevnem območju (Ceriani et al. 2000).

erozijski indeks	I_E	indeks plazljivosti	I_F
visoka stopnja erozivnosti	1	prisotnost aktivnih plazov ali plazov z možnostjo ponovnega aktiviranja	1
zmerna stopnja erozivnosti	2	prisotnost plazov, ampak ne neposredno ob strugi	2
majhna stopnja ali ni erozije	3	ni večjih oz. pomembnih plazov	3

Analize morfometričnih podatkov za opis vršaja in prispevnega območja so najbolj pogost pristop za določevanje prisotnih procesov in oceno magnitude teh procesov. S pomočjo regresijskih tehnik so bile testirane že številne metode (Takei 1984, Kronfellner-Kraus 1988, Rickenmann in Zimmermann 1993, D'Agostino 1996). Na podlagi vseh opravljenih statističnih analiz, enostavnih teoretičnih osnov in že obstoječih enačb je bila razvita nova nelinearna enačba:

$$M = k * (Ab)^a * (Mb)^b * (Scl\_c)^c * (I\_F)^{-d} \quad (10^3 \text{ m}^3), \quad (21)$$

pri čemer so vrednosti koeficientov navedene v preglednici 7.

Preglednica 7. Vrednosti koeficientov iz enačbe (21) (Ceriani et al. 2000).

vrsta transporta	k	a	b	c	d
vsi skupaj	3	1	0,8	1	2
drobirski tok	5,4	1	0,8	1	2
drobirski nanosi / rečno naplavljanje	3	1	0,8	1	2

Izkazalo se je, da analize z eno ali dvema spremenljivkama ne dajejo dovolj zanesljivih rezultatov. Analiza z večjim številom spremenljivk se izkaže za bolj ustrezno, saj je sistem hudourniško območje–vršaj zelo zapleten. Predlagana regresijska enačba za določevanje magnitude dogodka je različna za različne vrste transporta. Enačne je treba še testirati v različnih geoloških in geografskih pogojih. Vpeljava parametrov, kot sta erozijski indeks I\_E in indeks plazljivosti I\_F, je nujna za podrobnejši opis razmer v prispevnem območju. Indeksa predstavljata določeno aktivnost na nekem območju. Ta podatek je še posebej pomemben za vršaje, kjer so prisotni drobirski tokovi. Izkazalo se je, da geološki indeks G\_I nima pomembne vloge pri tovrstnih ocenah.

## Računalniške metode

*Schöberl et al. (2004)*

Za reševanje problemov na hudourniških vršajih se vseskozi razvijajo nove metode. Med distribuirane hidrološke modele se uvršča tudi model program PROMAB<sup>GIS</sup> (Schöberl et al., 2004). Program PROMAB<sup>GIS</sup> računa hidrogram in sedimentogram. Sestavljen je tako, da obdeluje povodje in procese, ki se tam odvijajo. Program je uporaben za računanje odtoka padavin in sedimentov za manjša alpska povodja, katerih površina je manjša od 20 km<sup>2</sup>. PROMAB<sup>GIS</sup> je bil razvit kot program, ki obravnava prostorsko spreminjanje vhodnih podatkov. Računanje poteka časovno odvisno. Ocena celotnega odtoka temelji na racionalni formuli, ki za osnovne enote ne jemlje podpovodij, ampak celotno povodje razdeli na mrežo, posamezni deli pa so obravnavani kot osnovne vhodne

enote. Določanje hidrograma temelji na izračunu mreže odtok/čas za območja z aktivnim odtokom. Izračun poteka po časovnih korakih.

Odtok sedimentov za vsako celico mreže pa se izračuna na podlagi določitve dejanskega procesa na tem delu povodja (erozija, transport ali akumulacija). Transportni procesi so štirje: tok čiste vode, prenašanje sedimentov, hiperkoncentriran tok in drobirski tok.

Program je bil umerjen na podlagi podatkov o katastrofalnih poplavah leta 1990, uporabili pa so ga tudi za predvidevanje nadaljnjih scenarijev dogodka.

Na podlagi podrobnih terenskih raziskav so na povodju Lainbach za različne možne scenarije določili odtok padavin in sedimentov z uporabo programa PROMAB<sup>GIS</sup>. Raziskani scenariji kažejo na pomembnost raziskave odločilnih procesov v povodju kot tudi na pomembnost določitve odtočnih koeficientov in hitrosti površinskega toka. Raziskava na območju Lainbach je pokazala, da poleg natančne določitve tehničnih parametrov in meritev na velikost odtoka močno vpliva tudi povečanje hrapavosti terena. Izkazalo se je, da je določanje vrste dogodka najbolj zahteven del in da to še vedno ostaja tema, odprta za razpravo.

Z uporabo programa PROMAB<sup>GIS</sup> je torej možno za vsak del povodja določiti hidro- in sedimentogram. Seveda je za uporabo programa potrebno določeno strokovno znanje o teh procesih.

## Zaključki

Empirične in statistične enačbe omogočajo približno oceno količin drobirskih tokov. Njihova uporaba mora biti omejena na območje, na katerem so bile razvite, saj le tam lahko zagotovimo njihovo predvideno natančnost. Bilo je dokazano, da empirične metode dajo zelo različne rezultate glede na to, katero enačbo uporabimo. Prav zaradi tega bi morali avtorji teh enačb natančno opisati, v kakšnih pogojih so bile razvite, in določili območja njihove uporabe. Uporaba enačbe brez predhodnje kontrole na določenem območju lahko prinese napačne rezultate, čeprav se lahko zgodi, da so rezultati v nekaterih primerih pravilni. Veliko število faktorjev vpliva na količino drobirskega toka, zato teh faktorjev ni mogoče enostavno vključiti v izračune.

V enačbah so parametri povodja izbrani kot neodvisne spremenljivke in so enostavno določljive iz topografskih in geoloških kart. Pozitiven je tudi vidik, kjer je uporabljena povezava med odtokom in količino drobirskega toka. Ta vidik pokaže zanimivo povezavo z laboratorijskimi raziskavami in enačbami za transport v strmih kanalih. Te metode bi bilo mogoče izboljšati, upoštevajoč zaloge drobirja v posameznem povodju.

Geomorfološke metode so bolj široko uporabne kot verjetnostne analize zgodovinskih podatkov, ker ne zahtevajo obširnih podatkov o preteklih dogodkih in so bolj prilagodljive kot nekatere polempirične enačbe, ki temeljijo na podatkih za neko določeno območje.

Verjetnostne analize zgodovinskih podatkov omogočajo optimalno uporabo podatkov za neko povodje in za grobo, ampak zanesljivo oceno magnitude drobirskih tokov. Prav tako omogočajo določitev približnih volumnov za določene povratne dobe dogodkov. Vendar pogosto pomanjkanje podatkov onemogoča tovrstne raziskave in posledično uporabo te vrste raziskav.

Vsaka od prikazanih metod ima svoje prednosti in slabosti. Zato je pogosto najboljša rešitev kombinacija različnih metod, s čimer omejimo slabosti posameznih metod.

## Literatura

- Bovis, M.J., Jakob, M. 1999. *The role of debris supply to determine debris flow activity in southwestern B.C.*, Earth Surface Processes and Landforms 24, 1039–1054.
- Ceriani, M., Crosta, G., Frattini, P., Quattrini, S. 2000. *Evaluation of hydrological hazard on alluvial fans*. INTERPRAEVENT 2000 – Villach, vol. 2: 213–225
- D'Agostino, V., 1996. *Analisi quantitativa e qualitativa del trasporto solido torrentizio nei bacini montani del Trentino Orientale*, In Scritti dedicati a Giovanni Tournon. Associazione Italiana di Ingegneria Agraria – Associazione Idrotecnica Italiana: Novara (Italy): 111–123.
- D'Agostino, V., Cerato, M., Coali, R. 1996. *Extreme events of sediments transport in the eastern Trentino torrents*. Interpreavent 1996 – Garmisch Partenkirchen, vol. 1: 377–386.
- Griswold, J.P. 2004. *Mobility Statistics and Hazard Mapping for Non-Volcanic Debris Flows and Rock Avalanches*. Unpublished Master thesis. Portland State University.
- Iverson, R.M., Schilling, S.P., Vallance, J.W. 1998. *Objective delineation of lahar inundation zones*. GSA Bulletin 110(8), 972–984.
- Jackson, Lionel E. Jr., Kostaschuk, R. A., MacDonald, G. M., 1987. *Identification of debris flow hazard on alluvial fans in the Canadian Rocky Mountain*. Reviews in Engineering Geology 4: 115–124.
- Jakob, M. 2005. *A size classification for debris flows*. Engineering geology 79: 151–161.
- Jitousono, T., Shimokawa, E., Tsuchiya S., 1996. *Debris flow following the eruption with pyroclastic flows in Merapi volcano, Indonesia*. Journal of Japan Society Erosion Control Engineering 48 (special issue): 109–116.
- Kronfellner-Krauss, G. *Extreme sedimentation and gulying of torrents*. Interpreavent 1984 – Villach, vol.2: 109–118
- Kronfellner-Krauss G. 1988. *New results and experiences in the quantitative estimation of torrents*. Mitteil. Der Frost. Bundesversuchsanstalt, Beitrage zur Wildbacherosions- und Lawinenforschung, Wien, Heft 159: 447–458.
- Marchi, L., Pasuto, A., Tecca, P. R., 1993. *Flow processes on alluvial fans in the Eastern Italian Alps*. Zeitschrift für Geomorphologie 37: 447–458.
- Marchi, L., D'Agostino, V. 2002. *Estimation of debris-flow magnitude in the eastern Italian Alps*: Earth Surface Processes and Landforms 29: 207–220.
- Melton, M.A., 1965. *The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in Southern Arizona*, Journal of Geology 73: 1–38.
- Mikoš, M. 2001. *Značilnosti drobirskih tokov*. Ujma, 2000/ 2001, št. 14–15: 295–299.
- Mizuyama, T., Kobashi, S., Ou., G. 1992. *Prediction of debris flow peak discharge*. Interpreavent 1992 - Bern, vol. 4: 99–108.
- Rickenmann, D., 1999. *Empirical relationships for debris flows*. Natural hazards 19: 44–74.
- Rickenmann, D., Zimmermann M., 1993. *The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis*. Geomorphology 8: 175–189.
- Schöberl, F., Stötter, J., Schönlaub, H., Ploner, A., Sönsner, T., Jenewein, S., Rinderer, M. 2004. *PROMAB<sup>GIS</sup>: A GIS-based tool for estimating runoff and sediment discharge in alpine catchment areas*. Interpreavent 2004 – Riva/Trient, vol.3: 271–282.
- Takei, A. 1984. *Interdependence of sediment budget between individual torrents and river-system*. Interpreavent 1984 – Villach, vol.2: 35–48.