

Predlog slovenskega izrazoslovja pobočnih premikanj - pobočnega transporta

Proposal of the Slovene terminology on slope movements - slope transport

Dragomir SKABERNE

Geološki zavod Slovenije, Dimičeva 14, 1000 Ljubljana, Slovenija

Ključne besede: težnostna (gravitacijska) pobočna premikanja, padanje, plazenje, sedimentni tokovi, slovenska terminologija

Key words: gravity slope movements, fall, slide, sediment flows, Slovene terminology

Povzetek

Predlagana je slovenska terminologija, povezana s težnostnimi (gravitacijskimi) pobočnimi premikanji, in nakratko so opredeljeni ter opisani posamezni procesi, ki naj bi predstavljali končne, relativno čiste člene znotraj kompleksnih mehanizmov transporta: prevračanje, padanje in kotaljenje, plazenje in tečenje (zrnski tok, drobirski tok, utekočinjeni tok, turbiditni kalni tok).

Abstract

Slovene terminology, synonymy for English terms, on gravity slope movements, and their genetic classification is proposed. Short definitions and descriptions of processes and their products are given. The treated terms represent end members within complex mechanisms of gravity slope movements: topple, fall, slide and flows (grain flow, debris flow, liquified/fluidized flow, turbidity currents - hyperconcentrated stream flow).

Uvod

Plaz Stože pod Mangartom, kot so poimenovali premikanja zemeljskega materiala v času od 15. do 18. novembra 2000 pod grebenom Stože zahodno od Mangarta, je v Gornjem Logu pod Mangartom povzročil smrt sedmih ljudi. Porušene ali zasute hiše, uničena infrastruktura in spremembe izgleda pokrajine so povzročile strah prebivalcev, ki so v negotovosti, da se katastrofa lahko ponovi, morali zapustiti svoje domove. Zaradi velikih razsežnosti (po ocenah naj bi bilo premaknjenega približno en mi-

lijon m³ materiala) in nenavadno hitrega gibanja (približno 10 m/s) je plaz Stože pod Mangartom vzbudil veliko zanimanje slovenske strokovne in laične javnosti. V začetku so premikanja zemeljskih gnot v javnih občilih označevali kot plaz, po objavi pogovora z dr. Matjažem Mikošem (Delo, 22. 11. 2000) in pozneje prispevka dr. Mitje Brillyja (Delo, priloga Znanost in razvoj, 29. 12. 2000) pa se je v širši javnosti in medijih začel uporabljati tudi izraz **murasti tok** kot hidrotehnični sinonim za angleški izraz *debris flow* (Pintar, 1977; Brilly et al., 1999; Mikoš, 2000). V geologiji in sedi-

mentologiji slovenimo angleški izraz *debris flow* kot **tok drobirja** ali **drobirski tok** (predlog v nadaljevanju). Menimo, da je takšno slovenjenje izraza *debris flow* primernejše kot murasti tok.

Zavedamo se številnih težav pri slovenjenju tujih strokovnih izrazov in iskanju primernih slovenskih sinonimov. Težave so večplastne. Na eni strani imajo nekateri jeziki za posamezne pojme več izrazov kot slovenščina ali pa enoznačni slovenski izraz ne obstaja in si pomagamo z opisom, včasih pa moramo skovati novega. Na drugi strani pa so v tuji in seveda tudi domači literaturi že znotraj ene stroke isti izrazi različno opredeljeni in uporabljeni. Še večje razlike se pojavljajo med posameznimi strokami, tudi sorodnimi, še posebej, če je komunikacija med njimi majhna. Različna terminologija med strokami pa je do neke mere tudi upravičena, saj se posamezne stroke zanimajo ali dajejo poudarek različnim lastnostim, ki opredeljujejo in opisujejo posamezne predmete, pojme, pojave ali procese itd.

Terminologija, ki poimenuje posamezne predmete in pojme, je zelo povezana tudi s klasifikacijo, ki jih združuje ali ločuje v posamezne skupine. Pri klasifikaciji lahko uporabimo dva pristopa. Skupine lahko oblikujemo glede na podobne opisne fizikalne in druge lastnosti (opisna klasifikacija) ali pa na podlagi pogojev njihovega nastanka (genetska klasifikacija). Pri dobri opisni klasifikaciji je potrebno izbrati tiste lastnosti, ki jih lahko opazujemo in določimo ter nas vodijo k razlagi pogojev njihovega nastanka ali obnašanja.

V nadaljevanju obravnavamo osnovne skupine težnostnih pobočnih premikanj (težnostnega pobočnega transporta) zemeljskega materiala, medtem ko se podrobnejših opisnih delitev znotraj posameznih skupin ne bomo lotevali. Pri tem se bomo držali geološkega in sedimentološkega "pogleda", pri katerem so predmet opazovanja predvsem produkti, sedimenti, nastali pod vplivom pobočnih premikanj, in manj premikanja sama. Ta lahko opazujemo in proučujemo le v recentnih sedimentacijskih okoljih, eksperimentalno v laboratorijih ali jih matematično modeliramo ter jih povezujemo z njihovim bolj ali manj jasnim zapisom v sedimentih in sedimentih kamninah.

V ta namen smo poleg sedimentološke

pregledali nekaj tuje in domače literature s področja inženirske geologije, reološke klasifikacije tokov in izrazoslovja, ki obravnava predvsem plazove v kamninah [hribinah], sedimentih in preperini [zemljinah]. (V oglatih oklepajih so rabljeni geomehanski termini.)

Razdelitev in opredelitev pobočnih premikanj

Za razdelitev in opredelitev pobočnih premikanj se uporabljajo različne lastnosti:

- okolje premikanj: kopenska (subaeralna) - podvodna (subakvatična);
- način premikanj: prevračanje, padanje, plazenje, tečenje; razmerje med trdnimi delci (sedimentom) in tekočino (običajno vodo) in/ali plinom (običajno zrakom) ter hitrost premikanja sta pomembni lastnosti, ki vplivata predvsem na reološke značilnosti tečenja;
- vrsta premikajočega materiala: - geoteknična delitev: hribina, zemljina (debelo-zrnata, drobnazrnata) - ali druga podrobnejša delitev, npr. granulometrična;
- stanje: aktivno, reaktivno, začasno mirujoče, neaktivno (speče), opuščeno, stabilizirano, reliefno, fosilno;
- širjenje: napredujoče, umikajoče, odpirajoče, omejujoče, pojemajoče, premikajoče;
- oblika: kompleksna, sestavljena, večvrstna, zaporedna, enostavna.

(Pretežno povzeto po Fell et al., 2000)

Če želimo podrobneje govoriti o pobočnih premikanjih, si najprej pogledimo, kaj s tem izrazom označujemo.

Pobočna premikanja - pobočni transport (*slope movements*) so različna gibanja kamninskih [hribinskih], sedimentnih in preperinskih [zemljinskih] mas (gmot) po pobočju pod vplivom težnosti (gravitacije). (V okroglih oklepajih je navedeno drugo izražje, ki bi ga lahko uporabljali).

Omenjena definicija pobočnih premikanj se do potankosti ujema z novo **definicijo zemeljskega plazenja** (*landslide*) (Fell et al., 2000; Ribičič, 2001). Predlagamo, da se za zemeljsko plazenje ohrani stara definicija, ki bo podana v nadaljevanju.

Večina podrobnejših razdelitev pobočnih premikanj se omejuje na kopensko okolje. Ta so zaradi človekove poselitve, dejavnosti

in morebitne ogroženosti bolj pereča, medtem ko so podvodna pobočna premikanja manj podrobno razčlenjena, a so v kamninskem zapisu Zemljine zgodovine pomembnejša in obsežnejša kot kopenska. Med kopenskimi in podvodnimi pobočnimi premikanji so nekatere razlike. Pri podvodnih premikanjih je sediment stalno nasičen z vodo, zaradi tega je kohezija drobnozrnatega sedimenta manjša; zaradi razlike v gostoti med vodo in zrakom je sila teže zaradi vzgona manjša; manjši so notranji strižni koti; prehodi iz enega načina premikanja v drugega so pogosto hitrejši in v nekaterih primerih možni edino pri podvodnih pobočnih premikanjih, npr. turbiditni (kalni) tokovi. Po drugi strani pa so fizikalni mehanizmi, pri različnih načinih pobočnih premikanj na kopnem in pod vodo zelo podobni, kljub velikim razlikam v lastnostih obdajajočih tekočin. In prav značaj, vrsta oziroma prevladujoča komponenta pobočnega premikanja je eden izmed naših glavnih interesov pri interpretaciji pogojev nastanka sedimentov in sedimentnih kamnin ter zaradi tega tudi eden glavnih kriterijev klasifikacije pobočnih premikanj.

Med glavne oziroma "čiste" načine pobočnih premikanj štejemo: prevračanje, padanje in kotaljenje, plazenje ter tečenje (sl. 1).

Prevračanje (*topple*) je rotacijsko gibanje strmo vpadajočih blokov in plošč kamnin, koherentnih sedimentov in preperine, ki so ločeni z diskontinuitetami (plastnatost, razpoke, foliacija itd.).

Padanje (*fall*) in **kotaljenje** (*roll*) je hitro neodvisno gibanje: prosto padanje, poskakovanje in kotaljenje dela kamnine, sedimenta ali preperine ob navpičnem ali po strmem pobočju. Pri tem lahko drobci udarjajo ob pobočje, vendar med njimi ni pomembnejše interakcije. Ločimo **primarno padanje** sveže odlomljenih kosov kamnin in preperine ter **sekundarno padanje** kamenja - klastov, ki so bili že prej mehansko ločeni in nekoliko premaknjeni. S primarnim padanjem so povezani tudi izrazi **odlom**, **podor**, **udor** (kraški udor) in **zrušek** (v umetnih površinskih in podzemskih izkopih), ki označujejo pojav. **Odlom** je lahko trenuten dogodek odlamljanja in geomorfološka oblika sveže odlomljenega dela stene, pobočja, medtem ko je **podor** prosto padanje, poskakovanje ali kotaljenje kamninskih mas. Ta-

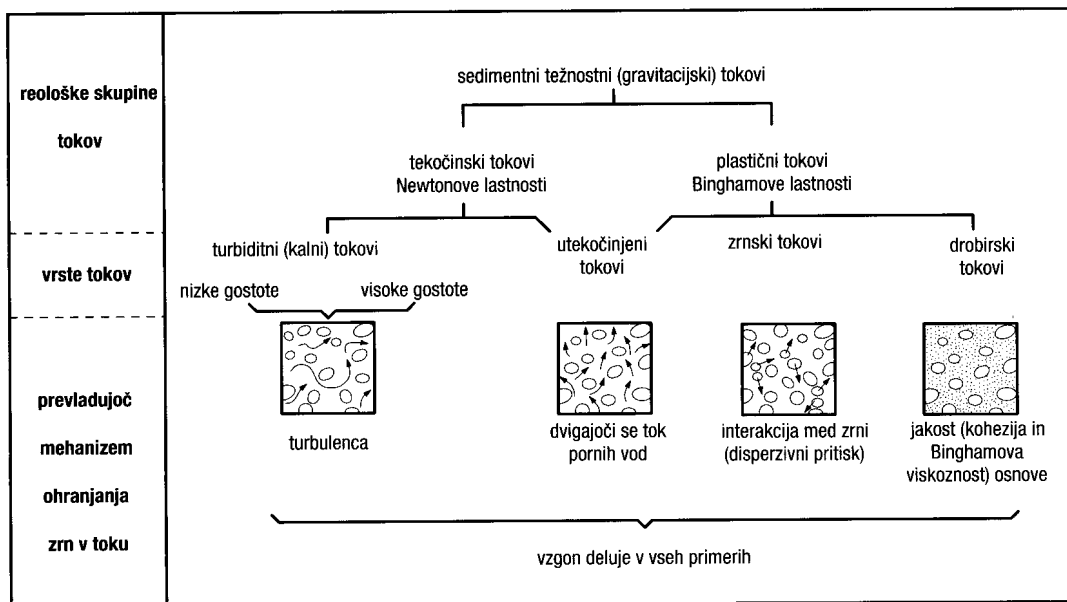
ko naj bi oba izraza (odlom in podor) ne bila sinonima, kot je razbrati iz pisanja Gamsa (1989), ampak odlom (trenutni dogodek) lahko preide v prevračanje ali padanje (podor). Sekundarno padanje kamenja je skupaj s podori glavni mehanizem nastajanja **pobočnega grušča** in **melišč** (kopenskih in podvodnih) (sl. 1).

Plazenje (*slide*) je translacijsko ali rotacijsko gibanje kamninskih [hrbinskih], sedimentnih in preperinskih [zemljinskih] mas po pobočju po eni ali večih bolj ali manj jasnih drsnih ploskvah ali plazinskih porušnih conah.

Običajno je splazela gmota notranje sorazmerno malo deformirana. Z angleškim izrazom *slide* se pojavljata izraza *slump* in *avalanche*, za katera uporabljamo samostalniško obliko **plaz** za poimenovanje pojava. Sediment nastal s plazenjem lahko imenujemo **plazovina** (sl. 1) (M i k o š, 2000). Z izrazom *slump* ponekod označujejo plazeči zemeljski material, ki je notranje močnejše porušen ali deformiran kot pri *slide*-u. Nekateri prevajajo *slump* kot usad (M i k o š, 2000), ki naj bi označeval manjši plaz ali zdrs. Iz nekaterih člankov se da razumeti, da uporabljajo izraz *avalanche* za relativno hitro subaeralno plazenje, pri katerem je kot medzrnski medij vključen predvsem zrak in morda malo vode ter lahko označuje hiter zrnski tok. Poleg navedenih zasledimo tudi izraza *glide* in *slip*, ki ju slovenito s samostalniško obliko **zdrs** za pojav in glagolsko **zdrseti**. Tako vidimo, da vseh angleških izrazov ne moremo enoznačno sloveniti.

Tečenje (*flow*) bi lahko opredelili kot zvezno, nepovratno deformacijo materiala, ki nastane zaradi napetostnega stanja v materialu, izzvanega s težnostjo. Geološki material, ki ga obravnavamo, predstavlja zmes trdnih (mineralnih, kamninskih, organskih) delcev - sedimenta ter vode in/ali zraka. Vendar odziv materiala na delovanje sil težnosti ni odvisen le od njegove sestave in zgradbe, temveč tudi od drugih dejavnikov, kot so npr. temperatura, čas in razvoj deformacij.

Sedimentne težnostne (gravitacijske) tokove (*sediment gravity flow*) bi lahko v sklopu različnih tokov opredelili kot tokove sedimentnega materiala, ki imajo večjo gostoto od obdajajoče tekočine in se pod vplivom težnosti (gravitacije) gibljejo po pobo-



Sl. 2. Sedimentni težnostni (gravitacijski) tokovi in prevladujoči mehanizmi ohranjanja zrn v toku (prirejeno po Middleton & Hampton, 1976).

Fig. 2. Sediment gravity flows and their dominant grain-support mechanisms (after Middleton & Hampton, 1976).

V naravi obstaja zvezni spekter volumskih razmerij med tekočino in sedimentom, od čiste tekočine - vode (0 % sedimenta) do suhega sedimenta (100 % sedimenta). V tem območju so tri mejna območja, ki kvantitativno niso enoznačno določena. Njihova vrednost je odvisna od porazdelitve velikosti zrn trdnih delcev in njihove mineralne sestave oziroma fizikalnih in kemičnih lastnosti. Te tri meje (točke A, B, C - sl. 3) ločujejo v reološki klasifikaciji štiri tipe tokov zmesi sediment-voda: zrnasti, blatni, prekoncentrirani vodni in normalni vodni tok.

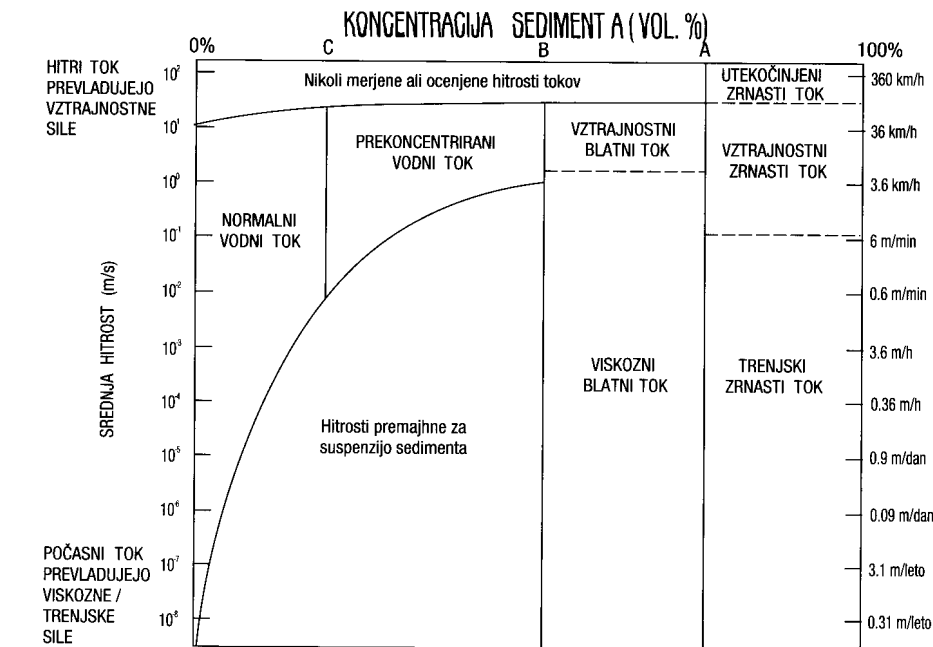
1. **Zrnasti tok** (*granular flow*) je tok zrnatega materiala, v katerem je medzrnski material iz zmesi vode in/ali zraka in drobnozrnatega materiala (mulja), vendar v tako majhni količini, da njihov porni tlak ne presega hidrostatičnega in se celotna teža zrnate gmote prenaša na medzrnske kontakte in/ali trke. Tok se obnaša plastično.

Pri počasnih premikih se večji del napelosti v deformirajoči tekoči masi prenaša s trenjem med zrni, ki je kombinirano z viskozniimi učinki medzrnskega materiala. Tak tok označujeta Pierson in Costa (1987) kot **trenjski zrnasti tok** (*frictional granular flow*) (sl. 3). Obsega navidezno-statični in

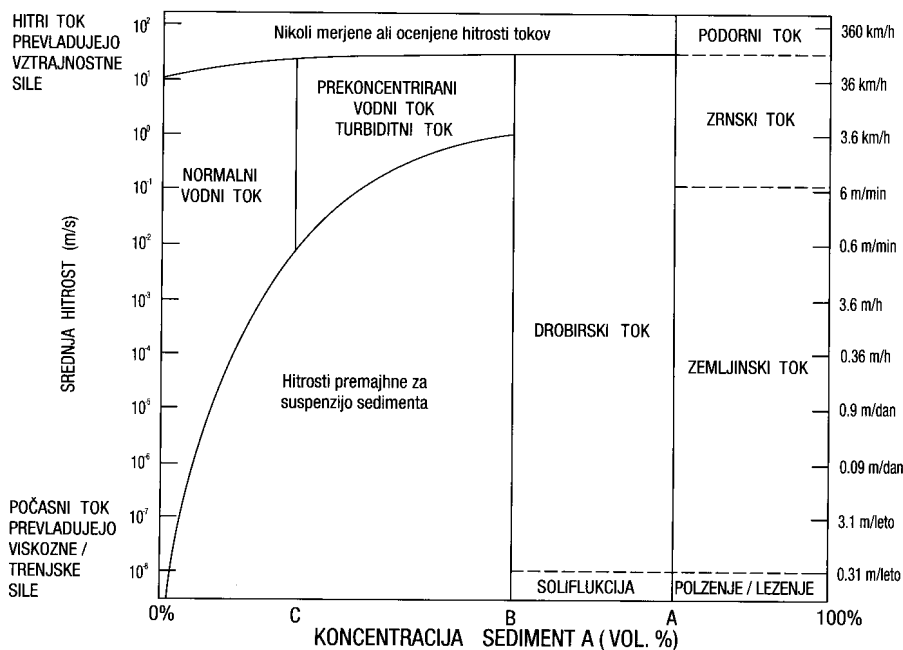
makroviskozni tokovni režim (Savage, 1984) in ga označujejo tudi kot **zemljinski tok** (*earth flow*). Tak tok naj bi imel povprečno hitrost manj kot 0,1 m/s. Zelo počasen neutekočinjen tok pa naj bi označevali kot **polzenje** ali **lezenje** (*creep*).

Pri drobnozrnatih kohezivnih sedimentih in preperini je čisti tok v območju trenjskega zrnatega toka ali zemljinskega toka večinoma izjema. Zaradi majhne količine vode se v premikajočem materialu pogosto razvijejo ločitvene razpoke in strižne cone vzdolž mej toka, zaradi česar postane plazenje pomembna komponenta premikanja.

Pri srednje hitrih premikih, za katere so srednje hitrosti v mejah 0,1 do 35 m/s (Pierson & Costa, 1987) začenjajo v toku prevladovati vztrajnostni učinki zrn, ki so odvisni od njihove hitrosti premikanja, pri tem pa je še vedno pomembno trenje med njimi. Trki zrn povzročajo nastanek disperzivnega pritiska (Bagnold, 1954), ki ohranja zrna v toku (sl. 2). Tak tok imenujemo **vztrajnostni zrnasti tok** (*inertial granular flow*) (sl. 3) (Pierson & Costa, 1987) in ustreza zrnskemu vztrajnostnemu tokovnemu režimu (Savage, 1984). Glede na obstoječo terminologijo tokov bi v tem



PORNA TEKOČINA	VODA	VODA + MULJ		VODA + ZRAK + MULJ
VRSTE TOKOV	TEKOČINSKI (VODNI) TOK		BLATNI TOK	ZRNASTI TOK



Sl. 3. Reološka klasifikacija tokov zmesi sediment - voda/zrak in ustrezna uporaba obstoječe terminologije tokov. Za razlago glej tekst (prirejeno po Pierson & Costa, 1987).

Fig. 3. Rheologic classification of sediment - water/air flows and fitting appropriate existing flow nomenclature into rheologic classification (after Pierson & Costa, 1987).

počasnejšem (0,1 do ~ 6 m/s) vztrajnostnem zrnastemu toku ustreza izraz **zrnski tok** (*grain flow*), hitrejšim (6 do 35 m/s) pa **drobirski plaz** (*debris avalanche*) (Pierson & Costa, 1987). Glede na podano definicijo plaz bi za celotno območje hitrosti vztrajnostnih zrnastih tokov uporabil termin zrnski tok (sl. 3).

V izredno hitro premikajočih velikih nekoherentnih gmotah, ki dosežejo povprečno hitrost tudi do 100 m/s je trenje med zrni neznatno, moment med njimi pa se prenaša z močnimi medzrnskimi trki. Tokove s takimi značilnostmi imenujejo **utekočinjeni zrnasti tokovi** (*fluidized granular flows*). Za njihovo poimenovanje je prišel tudi v angleščino nemški izraz *sturzstrom*, ki bi ga lahko slovenili kot **podorni tok** (sl. 3). Razlag nastanka mehanizma izredno hitrega premikanja takega toka je več. Ena med njimi predvideva "utekočinjenje" zrn v toku dvigajočega se zraka in prahu, ki je nastal zaradi stisnjenja zraka ob strmoglavljenju ogromne količine podornega materiala (Hsü, 1975). Primer na Aljaski kaže, da se je material lahko premikal tudi na zračni blazini.

Med zrnastimi tokovi je v sedimentnem zapisu najbolj razpoznaven zrnski tok, ki je pomemben način transporta na kopnem in pod vodo. Pogosto se sproži na strmih pobočjih melišč ali na odtočnih straneh peščenih sipin, ko naklon le-teh preseže kot notranjega trenja zrnkega materiala. Njihov produkt je **sediment zrnkega toka** (sl. 1).

Pri proučevanju zrnstih tokov je Lowe (1976) zaključil, da zrnski tok peščenih zrn ne more biti debelejši od nekaj centimetrov, in da sam ne more povzročiti nastanka posamezne debele in neteksturirane peščene plasti. Tako so sedimenti zrnstih tokov običajno vzporedno in navzkrižno laminirani in plastnati. V njih je sediment dobro sortirani, s ponekod opazno inverzno postopno zrnavostjo. Interne strukture niso opazne, posamezna zrna pa so orientirana z dolgimi osmi vzporedno s smerjo toka.

Inverzno postopno zrnavost (gradacijo) v sedimentih razlagajo z mehanizmi zrnkega toka na dva načina. Bagmald (1954) navaja, da je disperzijska napetost največja v bližini strižne ravnine, ob kateri na večja zrna delujejo večje napetosti kot na manjša. Tako se večja zrna dvigajo v toku, dokler se

napetostni gradient ne izenači. Druga razlaga, imenovana kinetično filtriranje, pravi, da se manjša zrna preprosto prefiltrirajo med večjimi, med seboj trkajočimi se zrni, dokler manjša ne obmirujejo v bližini strižne ravnine. Ta mehanizem je lepo viden pri stresanju, pri čemer se večja zrna dvigajo. Podobno kot razlika velikosti, vpliva tudi razlika gostot oziroma specifičnih tež. Zrna z večjo specifično težo se dvigajo v plasti zrnkega toka.

2. **Blatni tok** (*slurry flow*) je plastičen tok in se razvije v zmesi sedimentov in/ali preperine, z določeno stopnjo kohezije in vode. Če material nima kohezije, se bo tok obnašal kot zrnski tok tudi ob popolni zasičenosti z vodo. S povečanjem deleža vode v kohezivnem materialu se bo kohezijska strižna trdnost postopno zmanjševala do določene koncentracije (točke B - sl. 3), po njihovi prekoračitvi se hitrost upadanja strižne trdnosti hitro zmanjša in plastični tok preide v tekočinski. Ta točka oziroma količina vode v materialu je odvisna od porazdelitve velikosti zrn v njem in njegove mineralne sestave. V debeleje zrnatem in boljje sortiranem materialu je za ta prehod potrebna manjša količina vode in je ta ostrejši kot v slabše sortiranem in/ali drobnozrnatem materialu. Tudi mineralna sestava drobnozrnate glinaste frakcije vpliva na količino vode in značaj prehoda iz plastičnega v tekočinski tok. V smektitnih glinah je za ta prehod potrebno več vode in je ostrejši kot pri drugih glinastih mineralih.

Blatni tok, v katerem prevladujejo plastične Binghamove sile (kohezijska strižna trdnost in viskoznost) skupaj s povišanim pornim tlakom, ki presega hidrostatičnega, vzgonom in dinamičnimi mehanizmi lahko v suspenziji prenaša tudi velike bloke. V primeru, da njihova teža preseže suspenzijsko zmožnost blatnega toka, se lahko le-ti premikajo v njem v obliki talnega transporta. V primeru sorazmerno velike količine muljastega materiala ali relativno majhne velikosti zrn in njihove gostote, manjše količine vode ter hitrosti toka prevladujejo v toku viskozne sile. Tak tok se obnaša približno po linearnem Binghamov plastičnem modelu (Thomas, 1963; Johnson, 1970) in ga imenujejo **viskozni blatni tok** (*viscous slurry flow*) (Pierson & Costa, 1987). V primerih, ko je v toku povprečna

velikost zrn, njihova gostota, količina vode in hitrost dovolj velika, se viskoznost zmanjša. V takih razmerah se prevladujočim viskoznostnim silam v toku pridružijo še vztrajnostne sile, ki jih povzročajo trki med zrn in turbulentne sile. Tok s prevladujočim opisanim mehanizmom imenujejo **vztrajnostni blatni tok** (*inertial slurry flow*) (Pierson & Costa, 1987) in se obnaša podobno kot ga opisuje razteznostni tekočinski model (Takahashi, 1978). Prehod med viskoznim in vztrajnostnim blatnim tokom določa Bagnoldovo število. To je odvisno od empirične konstante, koncentracije zrn, njihove velikosti in gostote ter dinamičnega kota notranjega trenja. Za predpostavljeno debelozrnato sedimentno vodno zmes sta Pierson in Costa (1987) izračunala kritično hitrost prehoda, ki naj bi znašala približno 2 m/s. Ta kritična hitrost pa bi se spremenila v odvisnosti zgoraj navedenih parametrov.

Blatni tok teče, dokler težnostne sile še premagujejo kohezijsko strižno trdnost materiala. Pri tem lahko posamezni deli ali celotni tok "zmrzne", delci se med seboj relativno ne gibljejo več. "Zmrznjena" gmota se še lahko premika po vedno ožjih strižnih conah in drsnih ploskvah, tako da se blatni tok spremeni v plaz. V subaeralnih pogojih se material po ustavitvi konsolidira glede na hitrost dreniranja pornih vod, ki izpirajo tudi drobnozrnati muljasti material.

Za reološko obliko viskoznega in vztrajnostnega blatnega toka predlagata Pierson in Costa (1987) izraz **drobirski tok** (*debris flow*) (sl. 3) razen za zelo počasen tok z vodo nasičenih kohezivnih sedimentov, preperine ali drugega površinsekga materiala, ki ga imenujemo **soliflukcija** (*solifluction*).

Drobirski tokovi so tako plastični tokovi zmesi kohezivnega, pogosto slabo sortirane materiala in vode s spremenljivo porazdelitvijo velikosti zrn, koncentracijo, hitrostjo in notranjo dinamiko. Nekatere režime drobirskih tokov in njihovo povezavo z zrnskimi tokovi podaja Whipple (1997). Zrnaste in drobirske tokove povezujemo v skupino **masnih (gmotnih) tokov** (*mass flow*) (sl.1). Večja zrna in bloke ohranja v toku "moč" drobnozrnatih osnov z Binghamovimi silami (sl. 2) ob pomoči povečanega pornega tlaka vode, vzgona in pri večjih hitrostih tokov tudi trkov med zrn in turbulence.

Drobirski tokovi nastajajo v kopenskih in podvodnih sedimentacijskih okoljih in imajo v bistvu enako dinamiko. Običajno se razvijejo iz plazenja. Če ima drobnozrnata muljasta osnova tiksotropične lastnosti pa lahko ob različno povzročenem sunku mirujoča masa materiala v trenutku preide v drobirski tok. Na kopnem nastajajo drobirski tokovi v vseh klimatskih pogojih. Običajno jih povzroča hitro povečanje količine porne vode v materialu (močne padavine, hitro taljenje snega itd.), včasih pa so poleg tega povezani tudi s potresno in vulkansko dejavnostjo. V podvodnih okoljih, kjer je sediment že popolnoma zasičen z vodo, pa jih večinoma sprožajo preobremenitev in sunki, ki so posledica potresov, viharov ali potresnih (*tsunami*) valov. Na svoji poti lahko drobirski tokovi erodirajo tudi podlago, erodirani material pa odnašajo s seboj. V podvodnih okoljih se hitro premikajoči drobirski tok razredči z obdajajočo vodo, tako da lahko preide v tekočinsko obliko toka - turbiditni oziroma prekoncentrirani vodni tok.

Sediment drobirskega toka imenujemo genetsko tudi **debrit** (sl. 1). Za obsežne sedimentne tvorbe podvodnih drobirskih tokov je v uporabi tudi izraz **olistostroma**. Debriti so pogosto diamikti s precejšnjo, nekateri pa tudi z manjšo količino osnove, običajno so slabo sortirani in imajo pogosto kaotično teksturo s slabo notranjo organizacijo. Ponekod lahko zasledimo v spodnjih delih inverzno, v zgornjih pa normalno gradacijo zrnivosti. Kljub slabi notranji organizaciji so podolgovati klasti pogosto usmerjeni v dolgimi osmi v smeri toka. Tako nam prav analiza usmerjenosti klastov lahko pomaga pri ločevanju mehanizmov in procesov, ki dajejo strukturno podobne sedimente (Lindsay, 1970; Davies & Walker, 1974; Bavec, 2000).

Poleg tega moramo opozoriti, da se v angleškem jeziku izraz *debris flow* uporablja tudi v drugačnem pomenu, kot smo ga pozveli in opisali v tem prispevku.

V geotehnični in inženirsko geološki literaturi delijo material na dobro vezane oziroma trdne kamnine - hribine (*rock*) in nevezane - zemljine (*soil*). V nekaterih primerih ločijo še vmesno skupino polvezanih materialov - polhribine (*softrock*). Zemljine (*soil*) nadalje dele po granulometrični sesta-

vi na zemlje (*earth*), v katerih je manj kot 80 % zrn večjih od 2 mm (proda ali gruča) in drobir (*debris*), ki vsebuje več kot 80 % zrn večjih od 2 mm (Varnes, 1978; Fell et al., 2000). Glede na mehanske značilnosti pa ločijo nevezane materiale na kohezivne in nekohezivne. Vendar zgornja granulometrična razdelitev na zemlje in drobir ne odraža kohezijskih ali nekohezijskih mehanskih značilnosti. Če je v izrazu *debris flow* (drobirski tok, tok drobirja) beseda *debris* (drobir) uporabljena v granulometričnem smislu (Varnes, 1978; Fell et al., 2000), ta pomeni le premikanje drobirja v obliki toka, brez podrobnejše reološke karakterizacije in pogosto vodi do nesporednosti. Zato predlagamo uporabo izraza drobirski tok (*debris flow*) za reološko karakterizacijo toka, kot je podana zgoraj (sl. 2, 3). V primeru, da želimo v ime vključiti še izraz za material, ki se premika kot drobirski tok, pa naj bi ga podrobneje opredelili po eni izmed klasifikacij porazdelitve velikosti zrn (npr. grušnati drobirski tok, muljasti drobirski tok, muljasto peščeno prodnati drobirski tok).

Pri tem naj omenimo, da se je za drobirski tok vulkanoklastičnega materiala, ki je povezan z vulkansko dejavnostjo, uveljavilo ime **lahar**, ki je indonezijskega porekla.

Ker z izrazom *debris flow* (**drobirski tok**) označujemo značaj toka, ki je enak ali zelo podoben v kopenskih in podvodnih okoljih, se ne moremo strinjati s slovenjenjem izraza *debris flow* kot **murasti tok**, ki ga uporablja slovenska hidrotehnična stroka (Pintar, 1977; Brilly et al., 1999; Mikoš, 2000) in je prešel v zvezi s plazom Stože pod Mangartom tudi v širši medijski prostor. Izraz murasti tok je nemškega izvora (*die Mure*) in je preveden kot hudourniški nanos (Debenjak et al., 1992, 756). Poslovenjeni izraz **múra** označuje kašasto mešanico hudourniškega gruča (Brinar, 1970). *Die Mure, der Murgang* je nemško poimenovanje za sedimente in tokove v kopenskih hudourniških in aluvialno vršajnih okoljih, ki imajo lastnosti drobirskih tokov (*debris flow*), zato ga ne smemo uporabljati za reološko opredeljeno obliko toka, ki ima skoraj enake značilnosti v kopenskih in podvodnih okoljih. Če bi želeli uporabljati izraz murasti tok, bi morali njegovo uporabo omejiti le na subaeralne drobirske tokove (*subaeral*

debris flows). Poleg tega pa izraza mura in murasti tok nista slovenska, čeprav zaradi reke Mure zvenita domače.

3. **Turbiditni (kalni) tokovi** (*turbidity currents*) in **prekoncentrirani vodni tokovi** (*hyperconcentrated stream flow*) so tekočinski tokovi z zelo različno koncentracijo trdnih sedimentnih delcev v vodi. Prekoncentrirani vodni tokovi naj bi vsebovali od 20 do 60 % volumski delež trdnih delcev (Beverage & Culbertson, 1964). Spodnjo mejo prekoncentriranega vodnega toka in prehod v normalni vodni tok naj bi določala koncentracija sedimenta v vodi (točka C - sl. 3), ki daje mešanici v reološkem smislu rahlo plastičnost oziroma še merljivo kohezijsko strižno trdnost. Middleton (1966) loči turbiditne tokove v visoko koncentrirane (> 30 % suspendiranih trdnih delcev) in nizko koncentrirane (< 30 % suspendiranih trdnih delcev). Nekateri nizko koncentrirani turbiditni tokovi imajo že lastnosti normalnih vodnih tokov.

Tako so turbiditni tokovi in prekoncentrirani vodni tokovi le oblika bolj splošnih gostotnih tokov, katerih glavni mehanizem premikanja po pobočju je delovanje težnosti na razliko gostot med tokom in obdajajočo tekočino. To povzroča pri turbiditnih tokovih večja koncentracija suspendiranega sedimenta v toku. Glavni mehanizem ohranjanja zrn v toku je turbulenca (sl. 2).

Ti tokovi so najbolj razširjeni v vodnem okolju, vendar je oblikovanje tokov, ki so podobni turbiditnim, možno tudi v zraku npr. v prašnatih snežnih tokovih (plazovih); pri vulkanskem delovanju so to piroklastični valovi (*pyroclastic surge*). Piroklastični valovi predstavljajo razširjajoči turbulentni tok nizko koncentrirane suspenzije piroklastičnega materiala in zraka z nekaj vode.

Turbiditni tokovi lahko nastanejo na različne načine: 1. razvijejo se iz drobirskega toka; 2. povzroča jih neposreden dotok rečne vode z veliko suspendiranega materiala (hiperpiklični oblak), kar se dogaja pogostejše ob poplavalah, taljenju snega ob strmih obalah fjordov, na pobočjih delt in dovodnih kanalih; 3. z resedimentacijo sedimenta, ki so ga priobalni tokovi nakopičili v začetnih delih (glavah) podvodnih kanjonov, zaradi preobremenitve ali utekočinjenja. Ti procesi so najaktivnejši med neurji ali ob potresih.

Stabilne mase zrnatega nekohezivnega sedimenta lahko postanejo nestabilne in se utekočinijo (*liquefaction*, *fluidization*).

Pri porušitvi z vodo zasičenega sedimenta z rahlim zlogom pride do **porušnega utekočinjenja** ali **likvifikacije** (*liquefaction*), pri čemer se zrna ohranjajo v toku zaradi dviganja sproščenega viška porne vode. Tekočinski tok, ki nastane na tak način, pa imenujemo **utekočinjeni porušni tok** (*liquefied flow*) (sl. 1, 2). Glede na naklon pobočja, debelino utekočinjenega sedimenta in količino sproščene porne vode se bo utekočinjeni tok razvil v zrnski tok, se razredčil in prešel v turbiditni tok ali pa se ustavil, "zamrznil", pri čemer bo nastal **sediment utekočinjenega toka** z gostejšim zlogom zrn.

Če utekočinjenje sedimenta povzroči nadpritisk porne vode (pritisk, večji od hidrostatičnega) govorimo o **iztiskovalnem utekočinjenju** ali **fluidizaciji** (*fluidization*) oziroma **utekočinjenem iztiskovalnem toku** (*fluidized flow*) (sl. 1, 2). Utekočinjeni iztiskovalni tok lahko zajame večji volumen sedimenta v celoti, lahko pa je omejen le na ožja območja po hitri odložitvi večje količine sedimenta. Pri slednjem nastanejo teksture iztiskanja, npr. cevaste teksture, peščeni vulkani, skledaste teksture, konvolutna laminacija. V teh primerih bi lažje kot o iztisnjem utekočinskem toku govorili o posesimentacijskem *in situ* iztiskanju porne vode.

Laboratorijski poizkusi s turbiditnimi tokovi so pokazali, da lahko v turbiditnem toku ločimo glavo, telo in rep. Glava kalnega toka je običajno 1,5 do 2 krat debelejša od telesa. Hitrost njenega premikanja je odvisna od debeline glave, razlike gostot med kalnim tokom in obdajajočo tekočino, od empirične konstante, ki je odvisna od Reynoldsovega števila in neodvisna od spremembe naklona pobočja ter obratno sorazmerna z gostoto okoljne tekočine. Pri toku se ob glavi oblikujejo valovne nestabilnosti, ki omogočajo, da obdajajoča voda prodira v notranjost glave, kjer se meša s kalnim tokom ter ga s tem redči. Telo je večinoma enakomerno debelo, tok v njem pa je sorazmerno konstanten in enakomeren. Njegova hitrost je običajno 25 % večja od hitrosti glave. Tako telo do neke mere obnavlja koncentracijo, ki se je zaradi mešanja z obdajajočo vodo zmanjšala. Pri tem mešanju tokov v glavi kalnega toka nastaja območje zelo

divergentnih tokov, ki povzročajo turbulenco, potrebno za vzdrževanje suspenzije sedimenta (Middleton, 1966). Pri določeni kritični gostoti oziroma koncentraciji suspendiranega materiala (Pantin, 1979; Parker et al., 1986) lahko pride do erozije podlage in avtosuspenzije (Bagnold, 1962), ki vzdržuje določeno dinamično ravnovesje med turbulenco toka in gostoto suspenzije. V nadaljevanju svoje poti se valovita glava turbiditnega toka počasi razredči, upočasni in umiri, ker je dotok suspendiranega materiala iz telesa v glavo omejen. Podobno se dogaja, ko kanalizirani turbiditni tok preide na odprto ravnino bazena. Tu pride, do disperzije energije, razredčitve glave toka in hitrega usedanja, kar povzroči nastanek podvodnih vršajev. Večina odloženega materiala izvira iz telesa in repa turbiditnega toka. Obstaja več kombinacij časovnega in prostorskega zmanjšanja hitrosti in načinov usedanja, ki lahko vplivajo na vzorec odlaganja.

Pri turbiditnih tokovih visokih gostot lahko zasledimo več načinov usedanja sedimenta.

1. Hitro usedanje povezano z nestabilnostjo turbiditnega toka. Pri tem lahko sedimentacijo upočasnijo mehanizmi zrnskega in utekočinjenega toka.
2. Usedanje preko prehoda turbiditnega toka v peščeni drobirski tok. Temu lahko sledi "zamrznitev" in prehod v plazenje do končnega obmirovanja.
3. Usedanje zaradi konstantnega naraščanja debeline trenjske plasti pod stacionarnim turbiditnim tokom.
4. Usedanje zaradi konstantnega trenja pod stacionarnim turbiditnim tokom, ki ga premajhni dotok materiala ne more več premagovati. Ta proces naj bi bil pomemben pri odlaganju debeložrnatega materiala prodnikov.

Pri turbiditnih tokovih nizkih gostot in pri poznih fazah razredčenih turbiditnih tokov visokih gostot ali drobnozrnatih turbiditih se material odlaga: 1. počasi iz suspenzije, ali v kombinaciji talno transportirajočim se meljastim materialom; 2. s koncentracijo razredčene suspenzije, nastanka plastovitega počasi tekočega prekoncentriranega toka ter končno muljastega drobirskega toka do njegove "zamrznitve".

Turbiditni tokovi so eni glavnih transportnih mehanizmov debeložrnatega materiala v globoko vodno morsko okolje.

Iz teorije izhaja (Stow & Bowen, 1980; Allen, 1991), da se pri normalnih turbiditnih tokovih usede večina peščenega materiala v nekaj urah, medtem ko lahko traja sedimentacija drobnnozrnatega materiala iz repa turbidita tudi več dni in to iz vodnega stolpca, ki je lahko zakaljen tudi do 1000 m nad dnom, po katerem je tekel turbiditni tok.

Sedimente, odložene iz turbiditnega toka, imenujemo **turbidite** (sl. 1). Debelina posameznih turbiditnih plasti se spreminja od nekaj milimetrov do nekaj deset metrov, njihova zrnavost pa od gline do proda. Notranja zgradba turbidita je odvisna od njegove sestave (zrnavosti), dinamike toka, razdalje od izvornega območja in kompleksnosti odlagalne površine. Tako obstajajo trije facialni modeli za debele, srednje in drobnozrnatne turbidite. Debelozrnatni turbiditi so običajno debeleje plastnati, relativno slabo postopno zrnati in laminirani ter imajo malo bazalnih erozijskih sledov in so lahko kanalizirani. Srednje in drobnzrnatni turbiditi so srednje do tanko plastnati, dobro postopno zrnati in laminirani. Lateralno se raztezajo na velikih površinah in imajo na spodnjih ploskvah plastnatosti pogostejše erozijske teksture. V srednje zrnatih, peščenih turbiditih je Bouma (1962) ugotovil idealno zaporedje tekstur, ki je poznano kot Boumova sekvence. Spodaj nastopa masivni, normalno postopno zrnati interval A-T_a, sledi spodnji horizontalno laminirani interval B-T_b, navzkržno laminirani interval C-T_c, zgornji vzporedno laminirani interval ali menjavanje melja in meljaste gline D-T_d ter homogeni mulj E-T_e. Zaporedje tekstur kaže na zmanjševanje jakosti toka. Intervala A-T_a in B-T_b nastajata v pogojih zgornjega tokovnega režima, intervala C-T_c in D-T_d v pogojih spodnjega tokovnega režima, interval E-T_e pa se useda iz suspenzije in naj bi v zgornjem delu obsegal tudi hemipelagične sedimente.

Tako smo si ogledali večino enostavnih in kompleksnih mehanizmov pobočnih premikanj oziroma pobočnega transporta in predloge za njihovo slovensko poimenovanje ter nekatere značilnosti sedimentov, ki pri tem nastanejo.

Glede na povedano bi lahko večji del katastrofalnih pobočnih premikanj nad Logom pod Mangartom opredelili kot **drobirski tok** (*debris flow*) z notranjimi značilno-

stmi **vztrajnostnega blatnega toka** (*inertial slurry flow*).

Sklep

V svetu in tudi pri nas še ni enotne klasifikacije in terminologije pobočnih težnostnih (gravitacijskih) premikanj.

Navedene so kratke opredelitve in opisi posameznih procesov, ki naj bi predstavljali razmeroma čiste oblike oziroma končne člene znotraj kompleksnih in pogosto medsebojno povezanih ter odvisnih mehanizmov transporta, ki jih je težko med seboj ostro ločiti. S tem smo opisno, ne fizikalno-matematično, podali čim širši spekter pobočnih premikov v kopenskih in podvodnih okoljih z namenom, da se zavemo njihove kompleksnosti. Pri tem nismo obravnavali podrobnejših opisnih razčlenitev znotraj posameznih procesov.

Podan je predlog slovenske terminologije (slovenjenje *angleških izrazov*), povezane s pobočnimi premikanji (*slope movements*) zemeljskih mas: prevračanje (*topple*); padanje (*fall*) in kotaljenje (*roll*): podor (*rockfall*), udor, zrušek; plazenje (*slide, slump, avalanche*) in drsenje (*glide, slip*) ter tečenje (*flow*). V sklopu tečenja smo obravnavali sedimentne težnostne (gravitacijske) tokove (*sediment gravity flows*): zrnski tok (*grain flow*), zemljinski tok (*earth flow*), polzenje in lezenje mas (*mass creep*), podorni tok (*sturzstrom*), drobirski tok (*debris flow*), utekočinjene tokove: utekočinjeni porušni tok (*liquefied flow*), utekočinjeni iztiskovalni tok (*fluidized flow*) in turbiditne tokove (*turbidity currents*), prekoncentrirane vodne tokove (*hyperconcentrated stream flow*) in nizko koncentrirane normalne vodne tokove (*normal stream flow*). Poleg tega odsvetujemo slovenjenje izraza *debris flow* v reološkem smislu kot murasti tok.

Zahvala

Vsem, ki ste prebrali rokopis ali sodelovali v debati ter prispevali koristne pripombe in sugestije, ki so omogočile izboljšati besedilo članka, se najlepše zahvaljujem. Za tehnično pomoč velja zahvala Vidi Pavlici in Duški Živanovič.

Literatura

- Allen, J. R. L., 1991: The Bouma Division A and the possible duration of turbidity currents. - *J. Sed. Petrol.*, **61**, 291-295, Tulsa.
- Bagnold, R. A., 1954: Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. - *Proceedings of the Royal Society of London, series A*, **225**, 49-63, London.
- Bagnold, R. A., 1962: Auto-suspension of transported sediment; turbidity currents. - *Proceedings of the Royal Society of London, series A*, **265**, 315-319, London.
- Bavec, M., 2000: Analiza usmerjenih klavstov kot pomoč pri določanju in primerjavi geneze diamiktov in diamiktov v Bovški kotlini, Logu pod Mangartom in na Stožah. - *RMZ*, **47**, 3-4, 235-243, Ljubljana.
- Beverge, J. P. & Culbertson, J. K., 1964: Hyperconcentration of suspended sediment. - *Jour. Hydraulics Division, Amer. Soc. Civil Eng.*, **90**, HY6, 117-126, New York.
- Bouma, A. H., 1962: Sedimentology of some flysh deposits: A graphic approach to facies interpretation. - Elsevier, 168 str., Amsterdam.
- Brilly, M., Mikoš, M. & Sraj, M., 1999: Vodne ujme - varstvo pred poplavami, erozijo in plazovi. Univerzitetni učbenik. - Univerza v Ljubljani, 186 str., Ljubljana.
- Brinar, M., 1970: Gozdarski slovar. Zveza inženirjev in tehnikov gozdarstva in industrije za predelavo lesa Slovenije, 320 str., Ljubljana.
- Davies, I. C. & Waker, R. G., 1974: Transport and deposition of resedimented conglomerates: the Cap Enragé formation, Cambro-Ordovician, Gaspe, Quebec. - *J. Sed. Petrol.*, **44**, 1200-1216, Tulsa.
- Debenjak, D., Debenjak, B. & Debenjak, R., 1992: Veliki nemško - slovenski slovar. - Državna založba Slovenije d. d., 1329, Ljubljana.
- Fell, R., Hungr, O., Leoroueil, S. & Riemer, W., 2000. Keynote lecture - Geotechnical engineering of the stability of natural slopes, and cuts and fills. - v: *GeoEng 2000*, An international Conference on Geotechnical & Geological Engineering, Melbourne, Australia, Invited Papers and Extended Abstracts + CD, Technomic Publishing Company, Vol. 1, 21-120, Lancaster.
- Gams, I., 1989: Terminologija premikanj zemeljskih gmot. - *Ujma* **3**, 122-123, Ljubljana.
- Hsü, K. J., 1975: Catastrophic debris stream (sturzstrom) generated by rockfalls. - *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **86**, 129-140, Boulder.
- Johnson, A. M., 1970: Physical processes in geology. - Freeman and Cooper, 577 str., San Francisco.
- Lindsay, J. F., 1970: Clast fabric of till and its development. - *J. Sed. Petrol.*, **40**, 629-641, Tulsa.
- Lowe, D. R., 1976: Grain flow and grain flow deposits. - *J. Sed. Petrol.*, **46**, 188-199, Tulsa.
- Middleton, G. V., 1966: Experiments on density and turbidity currents. I. Motion of the head. - *Can. J. Earth Sci.*, **3**, 523-546, Edmonton.
- Middleton, G. V. & Hampton, M. A., 1976: Subaqueous sediment transport and deposition by gravity flows. - v: Stanley, D. J. & Swift, D. J. P. (eds.): *Marine Sediment Transport and Environmental Management*. John Wiley, 197-218, New York.
- Mikoš, M., 2000: Izrazje na področju erozijskih pojavov. - *Gradbeni vesnik*, **49**, 101-128, Ljubljana.
- Pantin, H. M. P., 1979: Interaction between velocity and effective density in turbidity flow: phase plane analysis, with criteria for autosuspension. - *Marine Geology*, **31**, 59-99, Amsterdam.
- Parker, G., Fukushima, Y. & Pantin, H. M., 1986: Selfacceleration turbidity currents. - *J. Fluid Mech.*, **171**, 145-181, London.
- Pierson, C. T. & Costa, E. J., 1987: A rheologic classification of subareal sediment-water flows. - *Reviews in Engineering Geology*, **7**, Geol. Soc. Amer., 1-12, Boulder.
- Pintar, J., 1977: Oznake pojmov s področja hidromorfologije, CIPRA 1977, referat, Podjetje za urejanje hudournikov, Ljubljana.
- Ribičič, M., 2001: Proučevanje plazov na terenu za opredelitev optimalnih korakov sanacije. - *Strokovna delavnica (delavno gradivo)*. Gradbeni inštitut ZRMK d.d., Ljubljana.
- Savage, S. B., 1984: The mechanics of rapid granular flows. - *Advances in Applied Mechanics*, **24**, 289-366, Boston.
- Stow, D. A. V. & Bowen, A. J., 1980: A physical model for the transport and sorting of fine grained sediments by turbidity currents. - *Sedimentology*, **27**, 31-46, Oxford.
- Takahashi, T., 1978: Mechanical characteristics of debris flow. - *Jour. Hydraulics Division, Amer. Soc. Civil Eng.*, **104**, HY8, 1153-1169, New York.
- Thomas, D. G., 1963: Non-Newtonian suspension; Physical properties and laminar transport characteristics. - *Industrial and Engineering Chemistry*, **55**, 11, 18-29, Washington.
- Varnes, D. J., 1978: Slope movement types and processes. - v: Schuster, R. L. & Krizek, R. J., eds., *Landslides analysis and control*. National Academy of Sciences, Transportation Research Board Special Report 176, 11-33, Washington.
- Whipple, K. L., 1997: Open-channel flow of Bingham fluids: application in debris-flow research. - *Jour. Geology*, **105**, 243-262, Chicago.