

# **HORIZONTALNE MIKROKOROZIJSKE VDOLBINICE**

Ljubljana, oktober 2009

Boštjan Burger

# Kazalo

Kazalo.....	2
1. Uvod.....	3
Namen in cilji.....	3
Delovna hipoteza.....	4
Metoda dela.....	5
Pregled dosedanjega preučevanja.....	6
Oprelitev pojmov.....	7
2.1. Adhezija.....	7
2.2. Brownovo gibanje drobnih delcev v kapljevini.....	7
2.3. Faseta.....	7
2.4. Korozijska vdolbinica.....	7
2.5. Kraške mikrooblike.....	8
2.6. Laminarni tok.....	8
2.7. Površinska napetost.....	8
2.8. Upor tekočine.....	8
2.9. Viskoznost.....	8
2.10. Kanal.....	8
2.11. Odlaganje materiala.....	9
3. Horizontalne vdolbinice – terensko preučevanje.....	10
3.1. Horizontalne mikrokorozijske vdolbinice.....	10
3.1.1. Najdene mikrokorozijske oblike.....	10
3.1.2. Ugotovitve terenskega dela.....	14
3.2. Morfološko podobne oblike odlaganja materiala.....	15
3.3. Poskus z odlaganjem materiala.....	20
3.3.1. Priprava previsne stene.....	20
3.3.2. Priprava blatne vode.....	21
3.3.3. Meritev na različnih kotih previsa.....	22
3.3.4. Fizikalna razlaga rezultatov simulacije.....	28
4. Procesi preoblikovanja površja.....	30
5. Primerjava povzetkov iz literature in delovne hipoteze.....	33
5.1. Povzetki iz literature.....	33
5.2. Povzetek iz delovne hipoteze.....	35
6. Zaključek.....	35
7. Viri in literatura.....	36

## 1. Uvod

Reliefno obliko po vertikali potekajočih valovitih horizontalnih vdolbinic sem opazil že pri svojih jamarskih aktivnostih, vendar se zaradi namena raziskovanja in dokumentiranja notranjosti jam nisem posvečal mikroreliefnim oblikam, ki so se pojavljale pod robovi brezen ali udornic. Pri dokumentiranju brezstropne jame na območju Rakovega Škocjana leta 2007 me je ta pojav pritegnil, saj sem na obrobem delu manjše udornice in pozneje še v neposredni bližini pod robom udornice v Tkalca jamo našel zelo izrazite horizontalno potekajoče vdolbinice, ki so se širile v nizih po vertikali. Pojav je zelo lepo strukturiran in z navidez enakomernim vzorcem. Pojav je bil opažen samo na vertikalni steni ali na previsu. Pozneje sem najdeno mikroreliefno obliko opisal, ter pokazal slike tudi jamarjem in raziskovalcem krasa. Vsi 'anketiranci', ki so bili pri raziskovanju jam in kraških pojavov aktivni, so po podanem opisu trdili, da so v preteklosti opisani pojav že videli, vendar podobno kot jaz prej, niso posvetili pozornosti tej mikroreliefnim oblikam v steni.

### ***Namen in cilji***

Osrednji namen raziskave je pojasniti proces nastanka reliefne oblike po vertikali potekajočih valovitih horizontalnih vdolbinic.

Za uresničitev osrednjega namena so zastavljeni naslednji cilji:

1. Preučiti literaturo, ki obravnava procese akumulacije prepereline ter drobnega materiala in preučiti literaturo, ki obravnava mikroreliefne oblike.
2. Poiskati in preučiti lokacije s pojavom obravnavanih mikroreliefnih oblik.
3. Poiskati in preučiti lokacije z morfološko podobnim pojavom preučevanih mikroreliefnih oblik. Poudarek je na podobnosti, kar pomeni obliko, ki je nastala kot posledica korozije, erozije ali akumulacije.
4. Narediti simulacijo oziroma poskus, ki je podlaga za nadaljnjo razlago pojava.
5. Preučiti fizikalne zakonitosti, ki vplivajo na nastanek.

## ***Delovna hipoteza***

Postavil sem delovno hipotezo, da je preučevani pojav valovitih horizontalnih vdolbinic posledica korozije. Glede na to, da je najdeni pojav pogost tudi pod odstranjenim mahom, rastočim na vertikalnih stenah ali previsih je domneva, da je glavni element korozije – biokorozija. Pojav se pojavi na previsih ali vertikalni steni zato, ker vertikalno padajoče dežne kapljice na pobočju s kotom manjšim od  $90^\circ$  odstranijo akumuliran material. V previsu naložen material nima stika, s padajočimi dežnimi kapljicami, zato nastaja akumulacija drobnega materiala.

## ***Metoda dela***

Vrstni red preučevanja je bil najprej najti lokacije s pojavom valovitih horizontalnih vdolbinic v kamnini, ki bi lahko bile posledica dejavnikov, ki sem jih postavil v delovni hipotezi.

Vzporedno z iskanjem horizontalnih vdolbinic v kamnini, sem s terenskim delom preučeval in dokumentiral tudi lokacije z morfološko podobnimi oblikami, to je nanosi odloženega drobnega materiala, ki bi omogočil, kot rastna podlaga pogoje za rast pionirskih organizmov, med katere sodi tudi mah.

Sledilo je preučevanje in razlaga odkod in kako je prišel material, ki je lahko različnega porekla – običajno kot ostanek toka blatne vode. Slednje je pomembno zlasti na kraškem območju, saj na površju ni površinskih tokov, ki bi prenašali material. Za razumevanje sem uporabil sem literaturo, iz katere sem dobil razlago o prenosu materiala v procesu denudacije.

Naslednji korak preučevanja je bil poskus fizikalne razlage zakaj z blatnim vodnim tokom prinesen material ostane odložen na steni v obliki horizontalnih v vertikali potekajočih pasov. V ta namen je bil izveden tudi poskus s simulacijo toka blatne vode po različnih previsnih kotih kamnine.

## ***Pregled dosedanjega preučevanja***

Sklepal sem, da so horizontalne vdolbinice posledica korozije stene, zato sem se lotil iskanja literature o mikrokorozijskih oblikah, ki bi konkretno obravnavala valovite horizontalne mikrokorozijske vdolbinice. Po pregledu slovenske literature nisem zasledil obravnave, ki bi preučevala horizontalne mikrokorozijske vdolbinice. Problem pri iskanju literature je bilo nepoznavanje terminološkega izraza, ki opisuje preučevani pojav.

V Slovenski Kraški terminologiji je bil z opisom pomena najbližje izraz 'korozijske gubice'. »Pojav drobne horizontalne nagubanosti nastane zaradi delovanja ploskovne, bržkone snežniške korozije.« (Gams, et al, 1973, str 69).

Tematike se je v vsebinsko najbližje dotaknil članek Geografskem obzorniku, Manj znane reliefne oblike v stenah Kraškega roba (Grmovšek, 2002). Obširna obravnava drobnih površinske korozijskih oblik je diplomsko delo Tipizacija in razporeditev drobnih površinskih korozijskih oblik na slovenskem krasu (Leskovar, 2007), vendar nisem zasledil konkretne obravnave preučevanega pojava. V tuji literaturi, dostopni v slovenskih knjižnicah sprva zaradi nepoznavanja termina, nisem našel ustrezne podrobnejše obravnave pojava horizontalnih po vertikali valovito potekajočih vdolbinic, zato sem se lotil lastne razlage nastanka pojava s pomočjo fizikalnih zakonitosti. Kasneje sem v spletni knjižnici, v knjigi *Typology of sculpted forms in open bedrock channels* (Richardson, 2005), zasledil obravnavo, ki se je vsebinsko ujela s pojavom, ki sem ga preučeval. V angleški terminologiji se pojav imenuje 'horizontal shallow solution ripples' iz katerega je bil verjetno prevedeno slovensko poimenovanje 'korozijske gubice'. Ko sem ugotovil termin za obravnavani pojav, sem ponovno preveril dostopno literaturo. S kratkim tekstom, vendar nazorno fotografijo je pojav opisan že v knjigi *Kras* (Jennings, 1971, str 43), ki jo omenja že Slovenska kraška terminologija.

## **Opredelitev pojmov**

### **2.1. Adhezija**

Adhezija je medsebojna privlačna sila med površinami dveh teles zaradi medmolekularnih sil.

### **2.2. Brownovo gibanje drobnih delcev v kapljevini**

Delci so specifično težji od kapljevine in bi morali v kapljevini padati in se zbirati na dnu, dejansko pa se gibljejo neurejeno v vseh smereh, večinoma sicer premočrtno, vendar pogosto (kot ob trku) spremenijo smer, da se gibljejo po cikcakasti črti. Takšno gibanje razpršenih delcev je posledica neurejenega udarjanja kapljevinskih molekul, ki z vseh strani obdajajo delce. Udarci molekul ob delce se v povprečju večinoma izničijo, toda tu in tam se zgodi, da dobi delec v eni smeri močnejši sunek in v tej smeri sune. Zaradi udarjanja kapljevinskih molekul, ki se gibljejo neurejeno, se tudi drobni delci razpršeni v kapljevini gibljejo neurejeno. Ker so ti delci relativno veliki, učinkuje na njihovo gibanje tudi teža. Zaradi navedenega gostota delcev v kapljevini ni enakomerna., saj se delci zgostijo na dnu (Kladnik, 1985).

### **2.3. Faseta**

Faseta je nekaj centimetrov ali decimetrov dolga ovalna vdolbinica v jamski steni ali dnu rova. Globlja in strmejša je na strani, iz katere je pritekla voda, ki je faseto izdelala. Po tem znaku so fasete indikatorji smeri vodnega toka. Možen je tudi drugačen nastanek (Gams & al., 1973).

### **2.4. Korozijska vdolbinica**

Korozijska vdolbinica je do nekaj centimetrov ali decimetrov široka in globoka skalna vdolbinica, nastala zaradi različnih vrst korozijske. Ena od oblik podtalnega krasa (Gams & al., 1973).

## **2.5. Kraške mikrooblike**

Kraške mikrooblike so manjše skalne oblike na kraškem površju ali v jamah v razsežnosti nekaj centimetrov do nekaj metrov. Izrazi, ki opredeljujejo 'izraz' so tudi mikrokraške oblike, mikrokorozijske oblike, korozijske mikrooblike, in mikroreliefne kraške oblike (Gams, 2003).

## **2.6. Laminarni tok**

Laminarni tok je tok tekočine, pri katerem so tokovnice urejene in gladke. Pri laminarnem toku je pomembna viskoznost tekočine. Nasprotje laminarnega toka je turbulentni tok.

## **2.7. Površinska napetost**

Površinska napetost je vzrok, da se kapljevina v majhnih množinah oblikuje v kroglaste kapljice. Dana je s površinsko silo na enoto dolžine mejne črte. Gladina kapljevine se ob stiku s trdnino in zrakom oblikuje tako, da je celotna površinska energija najmanjša.

## **2.8. Upor tekočine**

Upor tekočine ( $R$ ) je sila, ki povzroča zmanjšanje hitrosti tekočine. S to silo se ovira upira mimo tekoči tekočini, in je nasprotno enaka sili, s katero tekočina pritiska na oviro v smeri toka in ga vleče s seboj. Rezultanta pritiskov gibajoče se realne tekočine na telo ima vedno komponento  $R$  v smeri toka.

## **2.9. Viskoznost**

Viskoznost je notranje trenje različnih delov tekočine, ki se gibljejo z različnimi hitrostmi. Viskoznost je močnejša, čim večja je razlika hitrosti sosednjih plasti. Notranjega trenja ni, če je hitrostno polje homogeno in se vsak delec tekočine giblje z enako hitrostjo in v enaki smeri.

## **2.10. Kanal**

Izraz je v besedilu je mišljen kot nakazana linearna uglobitev v strmem pobočju.



## **2.11. Odlaganje materiala**

Angleška literatura s področja geomorfologije loči pri odloženem materialu med »deponiranim« in akumuliranim materialom. Razlika je v tem, da je »deponirani material, le začasno oz. le za krajše obdobje odložen material, akumuliran material pa je stalno oz. za daljše obdobje odloženi material. V slovenski terminologiji izraza »depozicija materiala" ni, zato je v besedilu uporabljen izraz »odlaganje materiala«.

### **3. Horizontalne vdolbinice – terensko preučevanje**

#### **3.1. Horizontalne mikrokorozijske vdolbinice**

Z izrazom 'horizontalne mikrokorozijske vdolbinice', ki ga uporabljam v nadaljevanju so mišljene 'korozijske gubice' kot navaja knjiga Slovenska kraška terminologija (Gams, 1973) oz. 'horizontal, very shallow solution ripples', kot navaja knjiga Kras (Jennings, 1971). Jennings navaja, da je opisani pojav našel na kraškem območju, na strmih (20-30°) – do vertikalnih kamninskih podlagah. »Vsak val oz. 'gubica' ima višino od 2-3 cm. Robovi valov so zaobljeni in podlaga je bolj gladka kot pri tvorjenju jamic zaradi dežja«(Jennings, 1971).

##### **3.1.1. Najdene mikrokorozijske oblike**

Horizontalne mikrokorozijske vdolbinice sem opazil pod gornjim robom udornice v Tkalco jamo. Na tem mestu so bili najdeni zelo izraziti in dolgi nizi horizontalnih mikrokorozijskih vdolbinic. Pojav je bil najden tudi na nekaterih mestih brezstropih jam severovzhodno od Rakovega Škocjana, kjer so bili horizontalne mikrokorozijske vdolbinice po vertikali kratke. V bližnjih manjših udornicah na območju Rakovega Škocjana, so bili opaženi več kot meter široki po vertikali potekajoči nizi horizontalnih mikrokorozijskih vdolbinic, ki so bile na mestih poraščene z mahom.

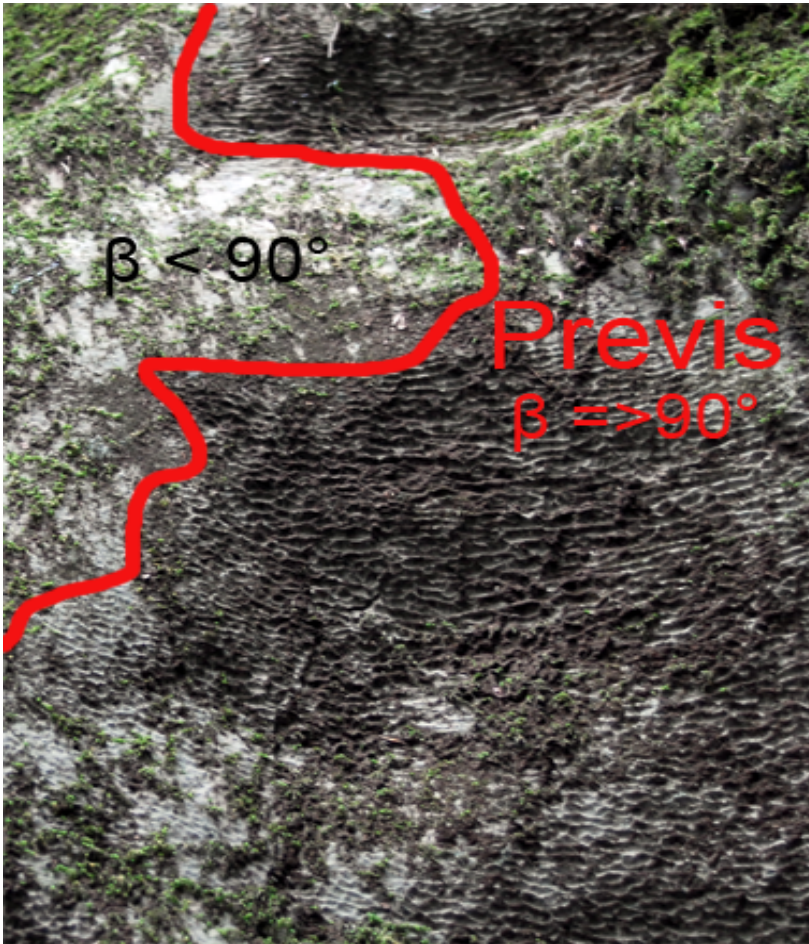


Slika 1. Razgaljene in na mestih z mahom poraščene horizontalne vdolbinice. Območje Rakovega Škocjana (foto: Boštjan Burger, april 2007).

Naklon kamnite stene, kjer so bile horizontalne mikrokorozijske vdolbinice razvite je bil merjen s kotomerom položenim na 25 cm dolgo ravno desko. Stena namreč ni bila enakomerno ravna temveč, zato se je zaradi poenostavljenja meritve vzelo povprečje za dolžino 25 cm. Globina in širina posameznega vala se je merila z mikrometrom.



Slika 3. Meritev globine in širine horizontalne vdolbinice z mikrometrom (foto: Boštjan Burger, april 2007).



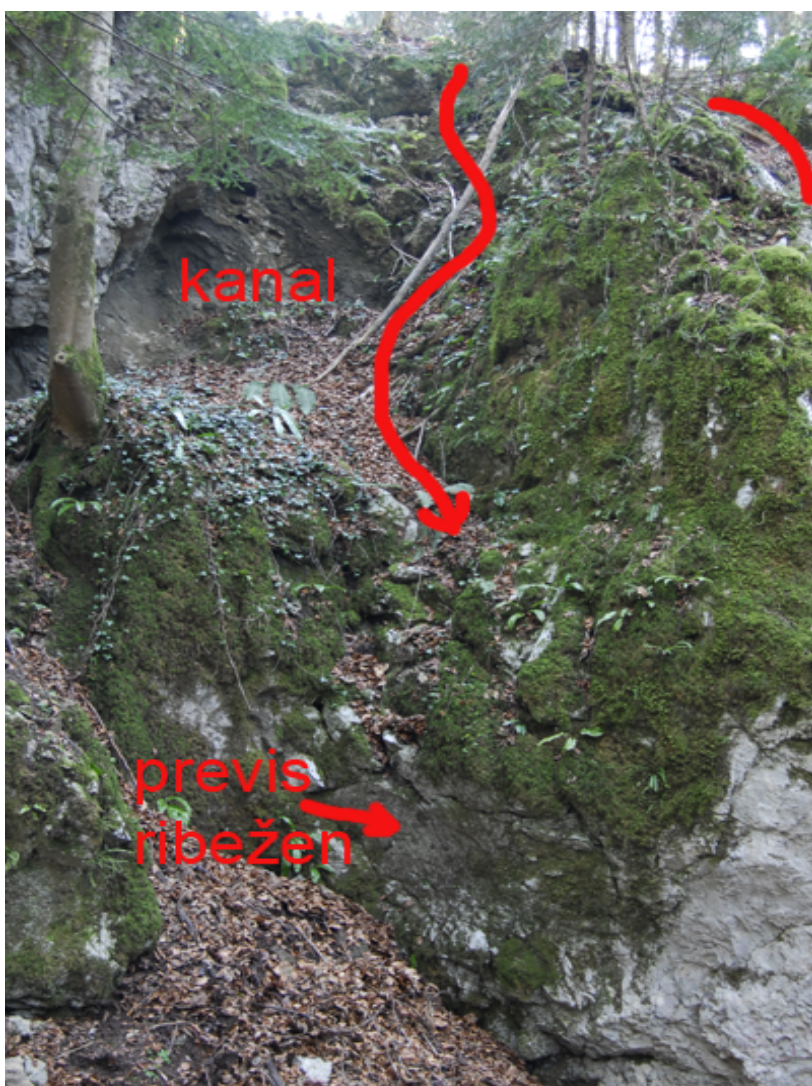
Slika 2. Horizontalne vdolbinice v previsu. Območje Rakovega Škocjana (foto: Boštjan Burger, april 2007).

### 3.1.2. Ugotovitve terenskega dela

Po terenskem opazovanju in opravljenih meritvah sem ugotovil, da preučevani pojav predstavlja horizontalne vdolbinice v nizih po vertikali, kjer je možna oblika tudi prehajanja horizontalnih vdolbinic v obliko podobno fasetam.

Dolžina vala je bila enakomerna in je bila na različnih merilnih mestih od 7 mm do 9,5 mm. Globina vala je bila 2 mm vendar so bila izmerjena tudi mesta z globino do 4 mm.

Izmerjen naklon stene, kjer so bile najdene horizontalne vdolbinice je bil od  $90^\circ$  -  $98^\circ$ . Nad vsakim merilnim mestom, kjer je bil opažen mikroreliefni pojav je bil kanal, ki nad steno dovaja blatno vodo - deževnico z izprano prstjo nad steno.



Slika 4. Položaj horizontalnih vdolbinic pod kanalom. Območje Rakovega Škocjana (foto: Boštjan Burger, april 2007).

### **3.2. Morfološko podobne oblike odlaganja materiala**

Odlaganje materiala na vertikalnih površinah, ki je morfološko podoben horizontalnim vdolbinicam je opazen tudi v urbanem okolju. Pogoj je le zadostna masa drobnega in homogenega materiala v vodni mešanici, ki se konstantno prenaša po vertikali iz višje lege proti nižji.

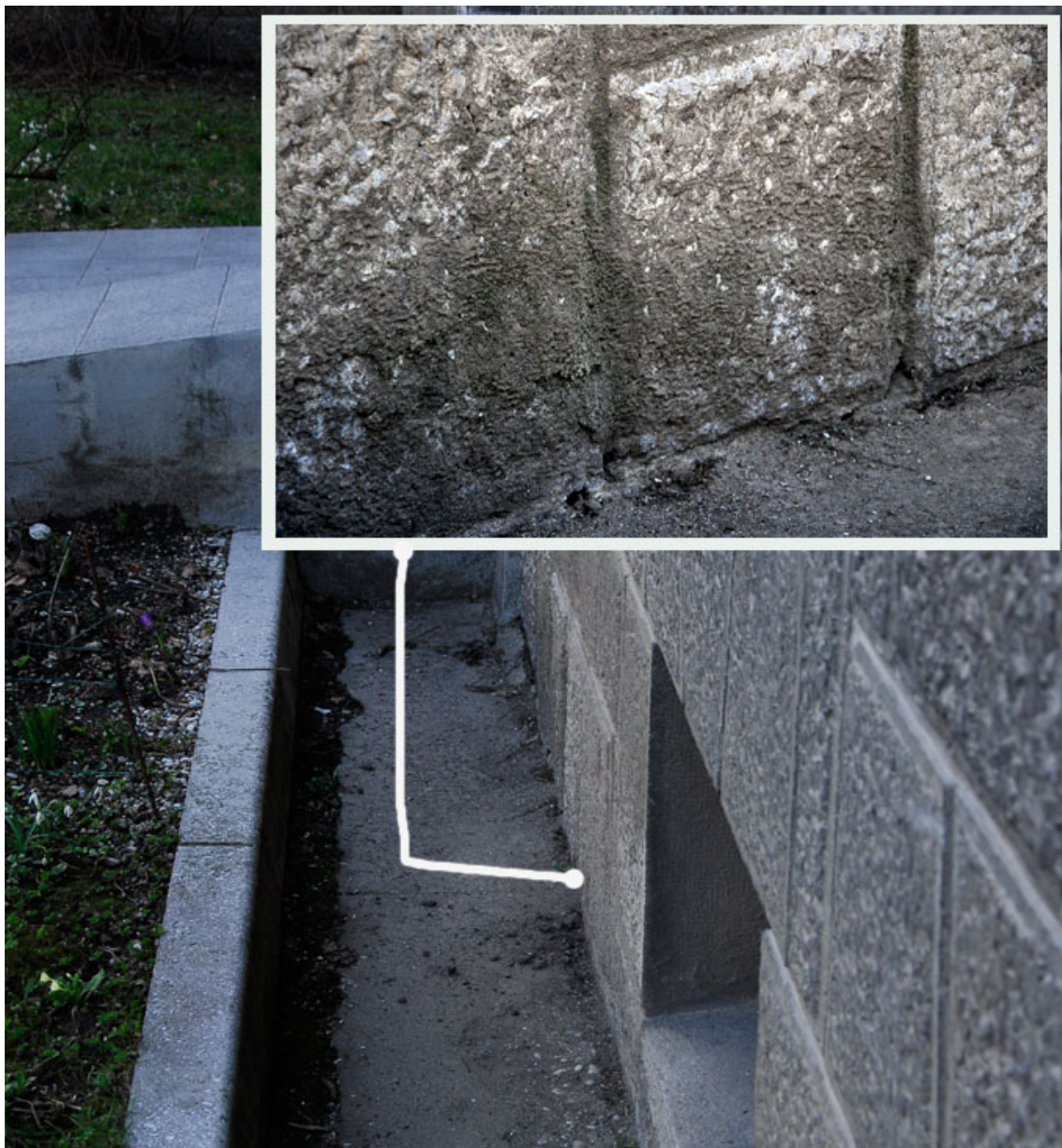
Nazoren zgled je blato na deblih dreves, ki je posledica drsenja blatne mase po močnem dežju. Dežne kapljice so po padcu na podlago prst ali preperino premaknile na višjo lego debela do višine ~ 50 cm. Blatna voda je kasneje po vertikali debela polzela navzdol in oblikovala blatne strdke v obliki niza ravnih horizontalnih črt po vertikali navzdol.



Slika 5. Odloženi material na deblih dreves v parku na Trgu republike v Ljubljani. (foto: Boštjan Burger, november 2008).

Korozijska oblika pod blatnim nanosom se zaradi organske podlage ni mogla razviti. Podobno se pojavi tudi pri fasadah hiš, kjer pride do prenosa drobnih

delcev iz podlage navzgor – podobno kot pri omenjenem zgledu z drevesnimi debli ali pa se ob dežju prenašajo kot preperina po fasadi navzdol.



Slika 6. Odloženi material na fasade stanovanjske hiše. (foto: Boštjan Burger, november 2008).



Podoben proces je opazen tudi na vertikalnih stopnic.



Slika 7. Odloženi material na stopnišču iz Cankarjeve ulice v podhod proti parku Tivoli. (foto: Boštjan Burger, november 2008).

Navedeni zgledi so iz urbanega okolja, vendar so bile pri terenskem opazovanju najdene odložene oblike materiala povsod kjer je po vertikalni ali previsni steni (izmerjeni koti: 90°-98°) tekla blatna voda.



Slika 8. Odloženi material na previsni skali. Kjer ni previsa je skala brez odloženega materiala. Apnenec; svež vkop za kolovoz, Dolina pri Pečah (foto: Boštjan Burger, marec 2009).

Kamninska podlaga za odlaganje ni bistvena, saj je bil pojav odlaganja viden tako na granitni podlagi (Korzika), breči (Kamniška Bistrica), drobnozrnati breči (Vače), laporju (Debeli rtič) ali apnencu (Rakov Škocjan).



Slika 9. Odloženi material na previsni steni iz drobnozrnate breče v Vačah (foto: Boštjan Burger, marec 2009).

### **3.3. Poskus z odlaganjem materiala**

Namen poskusa je bilo opazovanje gibanja toka blatne vode po previsu pri različnih hitrostih in različnih gostotah oz. volumenskih razmerjih med prstjo in vodo, ugotoviti kote pod katerimi blatna voda še teče po previsu, kakšna je adhezija pri različnih razmerjih trdih delcev v vodi in kako vpliva na odlaganje materiala na steni. Pridobljeni podatki so pozneje služili za poskus fizikalne razlage toka blatne vode in odlaganja trdnih delcev na steni.

#### **3.3.1. Priprava previsne stene**

Za pripravo previsne stene je bilo potrebno najti ustrezno kamninsko podlago. Pri strojnem trebljenju travnika v bližini izvedbe poskusa je nastal tudi ravni lom kamna, ki je ustrezal namenu priprave podlage za izvedbo poskusa. Skalni odlom s 30 cm dolgo in 21 cm široko podlago je bil primeren in dovolj praktičen za nastavitve različnih kotov previsa. Na vrh previsa je bila kot dovodna podlaga postavljena lesena deska, tako, da je bil omogočen dotok blatne vode na skalni vrh preloma in sama lesena deska ni imela vpliv na gibanje vode preko ali po previsu.



Slika 10. Priprava previsa za različne nastavitve kotov (foto: Boštjan Burger, oktober 2009).

### **3.3.2. Priprava blatne vode**

Blatna voda je bila pripravljena v različnih razmerjih. Kot vir trdnih delcev je služila sveža prst, vzeta iz krtin na bližnjem travniku. Ker za opazovanje toka blatne vode ni bilo potrebno eksaktno masno razmerje suhih delcev in vode, je bil za gostoto blatne vode postavljen kriterij razmerja volumna prsti in volumna deževnice vzete iz vodnega zbiralnika.



Slika 11. Priprava blatne vode (foto: Boštjan Burger, oktober 2009).

Blatna voda je bila pripravljena v štirih različnih razmerjih, ki so bila izbrana intuitivno:

- deževnica z majhnim dodatkom prsti – le toliko, da se je voda zaradi lažjega opazovanja vodnega toka obarvala,
- volumensko razmerje voda:prst (4:1),
- volumensko razmerje voda:prst (1:1),
- volumensko razmerje voda prst (1:4).

### 3.3.3. Meritev na različnih kotih previsa

Namen prvega dela poskusa je bilo ugotoviti kakšen je kritični kot previsa, ko blatna voda še teče po kamnini v previsu. Najprej je bil pripravljen previs s kotom  $90^\circ$ , potem pa se je kot v korakih povečeval dokler se ni blatna voda v celoti, kot slap prelila preko previsa.

Ker je bila z majhnim dodatkom prsti obarvana deževnica najmanj viskozna je bilo za opazovanje kritičnega previsnega kota izbrano to razmerje.

Slap se je pojavil že pri kotu  $90^\circ$ . Del blatne vode je stekel kot slap, del pa je zaradi adhezije stekel po steni. To opažanje velja za vsa pripravljena razmerja v blatni vodi. Pri toku blatne vode po steni se je opazilo pulzirajoč vodni tok kot posledica nadkritičnega laminarnega toka.



Slika 12. Slap preko previsa (foto: Boštjan Burger, oktober 2009).

Nastavitev kota previsa je potekala v korakih po 10°, dokler tok blatne vode po kamnini v previsu ni prenehal.



Slika 13. Previs s kotom 110° (foto: Boštjan Burger, oktober 2009).





Slika 14. Previs s kotom  $130^\circ$  (foto: Boštjan Burger, oktober 2009).



Slika 15. Previs s kotom 150° (foto: Boštjan Burger, oktober 2009).



Slika 16. Previs s kotom 160° (foto: Boštjan Burger, oktober 2009).

S prstjo obarvana deževnica je po previsu prenehala teči pri kotu 170°. Ker je bila to koračna nastavitev in je bila nastavitev bolj natančnih kotov težje izvedljiva je verjetno kritični tok za tok blatne vode med 160° - 170°.

Večji kot je bil kot, več je obarvane deževnice je preko previsa steklo kot slap in manj po kamnini v previsu.

Pripravila se je nova mešanica blatne vode v volumenskim razmerju voda:prst (4:1).

Tik preden se je blatna voda zčila po dovodu (leseni deski) je bila mešanica, potem ko se je pustila namočeno približno 10 min., temeljito premešana.

Blatna voda se je zčila preko previsa nastavljenega v kritičnem položaju, kjer je prenehala teči obarvana deževnica. Rezultat je bil isti, zato se je kot nastavil nazaj na 160° in blatna voda je tekla po previsu, tako kot obarvana deževnica.

Poskus se je ponovil z volumenskim razmerjem voda:prst (1:1).

Blatna voda pri kotih  $160^\circ$  in  $150^\circ$  po previsu ni stekla v celoti, vendar se je pod robom previsa v horizontalni smeri zaradi površinske napetosti nakopičila blatna voda v obliki izboklin, ki so mezele v obliki valov še nekaj centimetrov ( $\sim 5$  cm), se ločile od podlage in padle v vertikalo.

Pri kotih manjših od  $150^\circ$  je blatna voda v tem pripravljenem razmerju mešanice stekla po celotni dolžini pripravljenega previsa.

Sledil je poskus z blatno vodo v razmerju voda:prst (1:4).



Slika 17. Blatna voda z razmerjem deževnica: prst (1:4), kot previsa  $110^\circ$  (foto: Boštjan Burger, oktober 2009).

Kljub temu, da je bila prst za pripravo mešanice navidez homogena so se pri tej gosti mešanici pojavili številni sprimki.

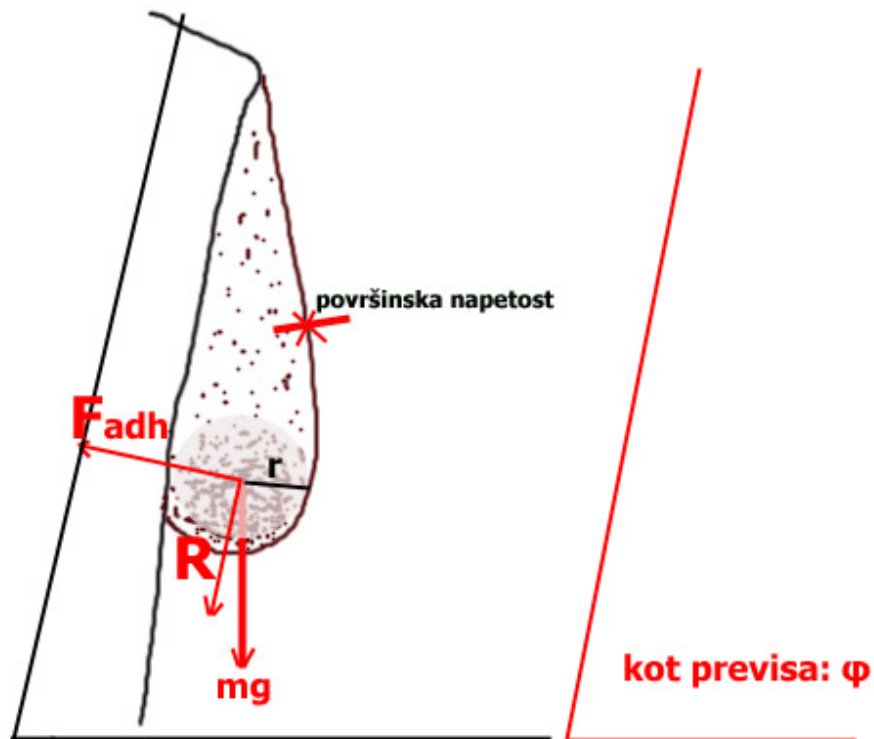
Pri kotu  $150^\circ$  in  $140^\circ$  se je pojavil isti pojav kot pri redkejši mešanici (1:1), le da se je material nabral le pod previsom, potem pa takoj padel po vertikali.

Pri kotu  $130^\circ$  in manj je blatna voda (4:1) ponovno stekla po previsu.

### **3.3.4. Fizikalna razlaga rezultatov simulacije**

V primerjavi z opazovanjem odlaganja materiala na vertikalni steni ali previsih v naravi, kjer so bili izmerjeni koti, kjer se je material odlagal ali pa se je razvil pojav horizontalnih vdolbinic na kamnini v kotih od  $90^\circ$  -  $98^\circ$ , je bil poskus, pri katerem je bil kot blatnega vodnega toka po kamnini večji od  $160^\circ$ , presenetljiv. Razlaga v razliki med koti v naravi in v poskusu je v tem, da so bili najdeni razviti pojavi odlaganja materiala na previsu, le slučajno v tem razmaku in bi se verjetno pojavili tudi v kotih izmerjenih na simuliranem naravnem previsu, če bi bil tudi izpolnjen pogoj dovoda blatne vode nad tak previs.

Močnejši tok blatne vode je stekel preko stene ali previsa kot slap, del pa je zaradi adhezije stekel po površini previsa. Gostejša kot je bila pripravljena mešanica blatne vode, krajši je bil pri določenem kotu previsa tok blatne vode. To razlagam z Brownovim gibanjem, kjer se delci zgostijo na dnu kapljevine in uporom tekočine. Bolj kot je gosta tekočina, več je delcev, ki se zgostijo na dnu. Skupaj jih drži površinska napetost. Ta zgostitev predstavlja maso, ki v valu polzi po kamnini previsa in postaja glede na volumen zaradi zgostitve vedno večja in končno pade po vertikali navzdol, to je takrat ko je sila mase večja od adhezije.



Slika 18. Skica teže mase zgoščenih delcev na previsu, adhezije  $F_{adh}$ , in  $R$  upor tekočine.

Za poenostavitev razlage je zgoščen del tekočine zreduciran na kapljevino, ki jo v kapljico z določeno maso združuje površinska napetost. Radij kroglastega dela zgoščenega dela vala je pogojen s površinsko napetostjo kapljevine. Površinska napetost združuje droben material in vodo v kroglasto izboklino s polmerom  $r$ . Ta kapljevina 'drsi' po podlagi pod vplivom poševne sile. Na telo učinkujeta teža  $mg$  ( $m$  je masa kroglaste izbokline v določeni širini izreza) in sila podlage  $F_p$ . Sila  $mg$  je sestavljena iz dinamične komponente  $mg \sin(\varphi)$ , ki pospešuje telo navzdol in statične komponente  $mg \cos(\varphi)$ . Sila podlage  $F_p$  je sestavljena iz sile  $N$ , ki je pri masi na pobočju enaka sili s katero telo pritiska na pravokotno na podlago. Ker gre v obravnavanem primeru za previs je komponenta  $N$  enaka adheziji ( $F_{adh}$ ) in ni odvisna od kota previsa. Naslednja komponenta sile podlage  $F_p$  je sila vzdolž podlage  $F'$ .

Trdni delci v blatni vodi po previsu dejansko ne drsijo temveč, na njihovo gibanje deluje več dejavnikov. Pomemben je upor tekočine ( $R$ ), ki je sila, ki povzroča zmanjšanje hitrosti tekočine. S to silo se ovira upira mimo tekoči tekočini, in je

nasprotno enaka sili, s katero tekočina pritiska na oviro v smeri toka in ga vleče s seboj. Rezultanta pritiskov gibajoče se realne tekočine na telo ima vedno komponento  $R$  v smeri toka.

Pri poskusu je razložen proces odlaganja materiala na previsu, in tudi nastanek radija izbokline odloženega materiala.

V poskusu ni pojasnjena vloga opaženega nadkritičnega laminarnega toka. 'Pulzirajoč' vodni tok, kot vzrok za nastanek preučevanega pojava je omenjen v strokovni literaturi, vendar ni povsem razložen vpliv na proces nastanka.

#### **4. Procesi preoblikovanja površja**

Če sledim delovni hipotezi, da je preučevani pojav posledica biokorozije, ki bila rezultat odloženega blata, oz. prepereline iz toka blatne vode, je potrebno najti razlago o vzrokih in procesu transporta prepereline od matične kamnine do vertikalne stene oz. previsa. Na kraškem območju ni površinskih vodonosnikov, vendar se na mikroreliefu oblikujejo linearne uglobitve po katerih se na manjše razdalje z vodnim tokom prenaša preperelina, ki je nastala v procesu preoblikovanja površja zaradi različnih dejavnikov.

Procesi preoblikovanja površja na fluvialnem in na kraškem območju so številni. Korozija je ponekod edini, drugje pa je le eden izmed procesov oblikovanja. »Ponornice, ki pritekajo z neprepustnih kamnin, vnašajo v podzemlje poleg ilovice in organskega gradiva tudi pesek in prod, v jamah se pridruži grušč, odpadel s stropa in sten. Te vode pa peska in proda ne prinašajo na površje pri izvirih. Očitno ju zmanjšuje in raztaplja vodna korozija. Prenašanje trdnih delcev pomeni erozijo jamskega skalnega oboda. Proces preoblikovanja krasa je tudi biokorozija. Pri tem ni mišljena korozija v tla prenikajoče vode padavinske vode s pomočjo biogenega  $\text{CO}_2$  v tleh« (Gams, 2003). Rastline kot mnogi drugi organizmi vgrajujejo karbonate v svojo zgradbo. Enoletna poraba kalcija na hektar zemljišča v bukovem gozdu je 78 kg, v jelovem gozdu 89 kg, hrastovem gozdu 64 kg in borovem gozdu 55 kg  $\text{CaCO}_3$ . Na milijon let preračunana poraba na hektar znaša med 93 in 158 ton  $\text{CaCO}_3$  (Lutz, 1962).

V vlažnem okolju je prisotno tudi razkrajanje kamnine, v katero se je nad površino zakoreninil mah.

Gostota karbonatnih kamnin je od 1,5 do 2,9 g/cm<sup>3</sup>. Intenzivnost procesa korozije je močno odvisna od površine kamnine (Gunn, 2004). Meritev intenzivnosti erozije in korozije s tabletami daje za dve stopnje nižje rezultate v primerjavi s hidrokemično meritvijo. Razlog je dejstvo, da je naravna kamnina z istim tlorisom izpostavljena večji količini vode kot tableta, ki je umetno gladka (Crowther, 1983).

Stopnja denudacije zaradi korozije karbonatne ploskovne podlage je od 10 μ m/a do 50 μ m/a, kar pomeni znižanje površine le nekaj centimetrov v tisoč letih. Voda, ki teče vertikalno navzdol, z nekaj milimetrov debelim vodnim slojem dosega hitrosti od 1 do 10 m/s in je v superkričnem laminarnem toku.

Stopnja denudacije zaradi erozije karbonatne kamnine je v rangu od 300 do 800 μ m/a, in je odvisna od debeline vodnega toka. V primeru, da voda teče po vertikalni steni nepretrgoma je denudacija vertikalne stene lahko tudi 1 m v 1000 letih. (Dreybrodt, 1985).

Korozijske oblike se najlepše oblikujejo v homogeni, nepretrti, drobnozrnati kamnini. Sedimentacijske oblike so zelo razširjene v previsnih območjih sten (Grmovšek, 2002). Med take sedimentacijske oblike sodijo sigova rebra, ježki, grudaste tvorbe in tudi mikro ponvice, ki so bile najdene na previsni steni v Bosonogem rovu v Novi Križni jami ter celo v urbanem okolju.



Slika 19. Akumulacija pod kamnito ograjo nad reko Ljubljanico pri leseni brvi vzdolžno od Tromostovja v Ljubljani (foto: Boštjan Burger, september 2009).

Voda, ki izloča sigo priteče laminarno iznad previsne stene, lahko tudi kanala kjer mora biti izliv laminaren. Voda počasi polzi, obenem pa se sprošča  $\text{CO}_2$  in voda izhlapeva ter v primeru karbonatne podlage, s katere je pritekal odlaga kalcit.

Po prenehanju vodnega toka, del blatne vode počasi izhlapeva in pride do biokemične korozije zaradi modrozelenih alg Cyanobacteria, ki živijo na površini skale (Grmovšek, 2002), ali pa nastane rastna podlaga za pionirske rastline – mah.



## 5. Primerjava povzetkov iz literature in delovne hipoteze

### 5.1. Povzetki iz literature

Korozijske gubice so prečne, lahnemu valovanju podobne korozijske oblike, ki so oblikovane na vertikalnih stenah ali previsih. Nastale so zaradi tankega vodnega toka po površini kamnine. Valovna dolžina nastalih valov je do 3 cm. Morfološko so podobne dvodimenzionalnim fasetam, vendar so posledica popolnoma drugačnega, to je turbulentnega vodnega toka. Korozijske gubice so obrnjene prečno glede na vodni tok po površini kamnine in niso nujno obrnjene povsem horizontalno. Če voda teče po vertikali ali horizontali samo zaradi gravitacije, potem so grebeni valov horizontalni. Nastane pa ta korozijska oblika tudi pod vplivom poševnega toka vode. Nastala korozijska oblika je potem lahko v kotu v katerem je tekla voda (Richardson, 2005).

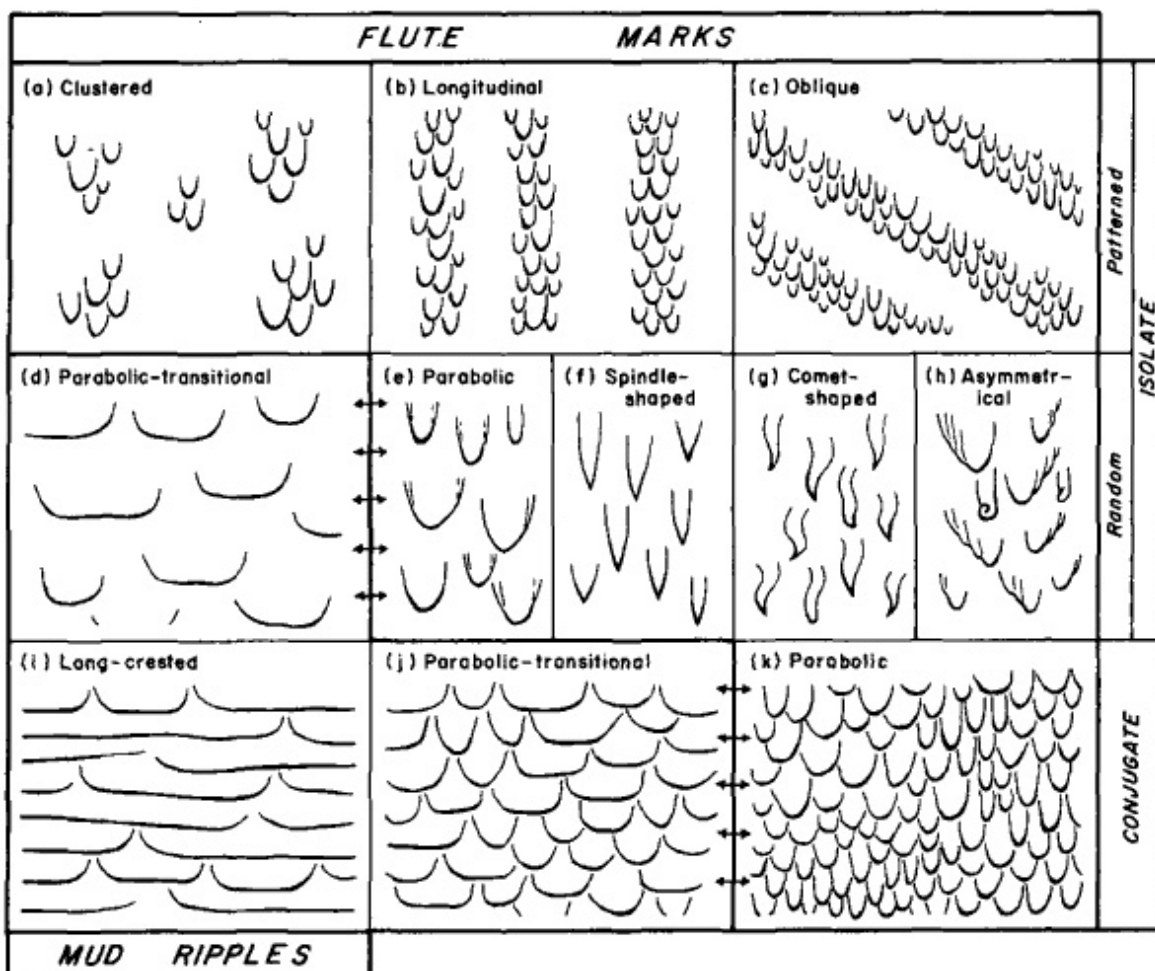


Slika 20. Fotografija korozijskih gubic (Richardson, 1985)

Korozijske gubice so omenjene kot korozijski pojav zaradi pulzirajočega toka snežnice v visokogorju, z relativno širokimi valovi. Korozijske gubice najdene v tropskem vlažnem krasu se pojavljajo predvsem na previsih. Valovi so precej ožji in ostrejšimi rebri med posameznimi valovi. Po vsej verjetnosti po kamnini tekoča voda ni sveža, in je imela že prej kontakt s kamnino, humusom in prstjo (Jennings, 1971).

Pomembno vlogo pri oblikovanju korozijskih oblik ima tudi način vodnega toka po kamniti steni. Korozijske gubice so verjetno posledica pulzirajočega vodnega toka po površini kamnine. Fasete in ponvice se ne pojavijo tam, kjer je v vodi veliko peska ali blata (Sweetings, 1972).

Z različnimi vodnimi tokovi in različnim materialom v blatni vodi nastajajo lahko morfološko podobne oblike, kot nakazuje slika 21.



Slika 21. Oblike s procesom nastanka faseta ('flute marks') in blatni valovi. (Allen, 1982).

## **5.2. Povzetek iz delovne hipoteze**

Nastanek mikrokorozijskih horizontalnih vdolbinic je posledica selektivne korozije, pri nepopolnem raztapljanju nastaja preperelina, ki jo sprotno erodira hitro tekoča voda. Pod previsom ( $>90^\circ$ ) preperelina ostaja in stena nastane hrapava.

Pod previsom kjer se pojavi ribežen nastaja vršaj fine neraztopljene prepereline in trdnih delcev iz toka blatne vode. Ob primerni gostoti blatne vode na koncu kanala, doseže blatni tok. Po dežju se dovod blatne vode prekine in na posameznih mestih ostane preperelina ujeto v žleb. Kjer je debelina blata večja je tudi večja koncentracija CO<sub>2</sub>, posledično je tam večja korozija in nastane značilna oblika žleba. Tako nastali horizontalno potekajoči žlebovi na določenih mestih preidejo v obliko podobni fasetam, kar je odvisno od spreminjanja smeri vertikalnega blatnega toka.

Velikost in globina horizontalnih žlebov je pogojena z razmerjem med korozijo in odnašanjem prepereline.

Kar je pomembno: vzorec - intervali med posameznimi žlebovi se tako ohranjajo oziroma ostajajo praviloma v velikosti intervala v vertikali med 7 - 9,5 mm in globino 2 mm.

## **6. Zaključek**

Razlaga nastanka preučevane mikroreliefne oblike iz strokovne literature je, da je reliefna oblika po vertikali potekajočih valovitih horizontalnih vdolbinic posledica korozije, ki jo je stimuliral pulzirajoči vodni tok. Primerjava je v nasprotju z mojo delovno hipotezo o biokoroziji kot bistvenemu elementu pri procesu nastanka preučevanega pojava. Literatura omenja 'korozijske gubice' v visokogorju, kjer je bistveni element po kamnini tekoč pulzirajoč tok snežnice. Korozijske gubice, ki so opisno to kar sem preučeval, torej po vertikali valovite horizontalne mikrokorozijske vdolbinice, so na fotografijah v literaturi drugačne kot moje dokumentirane, čeprav gre v opisu za identično obliko (primerjava slike 1 in slike

20). Fotografija in kratek opis pojava v tropskem krasu z omembo agresivnejše vode, kjer se horizontalne vdolbinice pojavijo na previsu (Jennings 1971), je že podoben mojim ugotovitvam.

Opravljen poskus s simulacijo toka blatne vode po različnih previsih je pokazal, da se po previsu, pri redkejši blatni vodi ustvari tanek vodni film, pri katerem se pojavi nadkritični laminarni tok. Vodni tok 'pulzira' in teče po vertikalni steni ali previsu. Ta ugotovitev potrjuje trditvam iz preučevane literature, da je pri procesu nastanka prisoten pulzirajoč tudi vodni tok. Terensko preučevanje pojava, kjer so bile po vertikali potekajoče valovite horizontalne gubice na mestih poraščene z mahom in pozneje tudi poskus z gostejšo blatno vodo, kjer so se na previsu oblikovali 'blatni valovi' in po prenehanju toka blatne vode tudi ostali na previsu in se pozneje strdili v valovite blatne sprimke, sta dala osnovo za postavitve delovne hipoteze o naselitvi pionirskih organizmov na odloženi preperelini.

Primerjava obeh razlag s pulzirajočim vodnim tokom in odložene prepereline, da zaključek, da oba procesa prispevata k nastanku horizontalnih mikrokorozijskih vdolbinic.

## 7. Viri in literatura

- Allen, J., 1982. Sedimentary structures: their character and physical basis, Volume 2, Elsevier Scientific Publishing Company, str. 225-314.
- Crowther, J., 1983. A comparison of rock tablet and water hardness methods for determining chemical erosion rates on karst surfaces, Zeitschrift für Geomorphologie, 27, str. 55-64.
- Dreybrodt, W., 1988. Processes in Karst Systems, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 288 str.
- Gams, I., 1971. Podtalne kraške oblike. Geografski vestnik 43, str. 27–45.
- Gams, I., 1952, Nekatero oblike spreminjanja površja zaradi erozije talne vode. Geografski vestnik 24, str. 210–211.

- Gams, I., 2003. Kras v Sloveniji v prostoru in času, Založba ZRC, ZRC SAZU, str 516.
- Gams, I., Kunaver, J., Radinja, D., 1973. Slovenska kraška terminologija. Ljubljana, Oddelek za geografijo Univerze v Ljubljani, 76 str.
- Grmovšek, A., 2002. Geografski obzornik, letnik 49, Manj znane reliefne oblike v stenah kraškega roba, str 12-17.
- Gunn, J., 2004. Erosion rates: field measurements, Encyclopedia of Caves and Karst Science, Taylor & Francis Group, London, 902 str.
- Jennings, J. N., 1971. Karst, The M.I.T. press, 253 str.
- Kladnik, R., 1985. Visokošolska fizika, Državna založba Slovenije, 235 str.
- Koškin, N.I., 1974. Priročnik elementarne fizike, Tehniška založba Slovenije, 246 str.
- Leskovar, A., 2007. Tipizacija in razporeditev drobnih površinskih korozijskih oblik na slovenskem krasu, diplomsko delo, Ljubljana, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo. 177 str.
- Mihevc, A., 2005. Voda in življenje v kamniti pokrajini KRAS, Založba ZRC, ZRC SAZU, 564 str.
- Richardson, K., Carling, P., 2005, A typology of sculpted forms in open bedrock channels, Geological Society of America. str 69-76.
- Selley, R., 2005, Sedimentary processes, Encyclopedia of geology. Knjiga 4. 2005., Elsevier l.t.d. str. 679-687.
- Sweeting, M., 1972, Karst Landforms, Macmillan, 362 str.