

UDK/UDC: 531.724:556.012(083.76)

Prejeto/Received: 06.10.2019

Izvirni znanstveni članek – Original scientific paper

Sprejeto/Accepted: 18.11.2019

DOLOČANJE ZRNAVOSTI GROBIH AGREGATOV IN SEDIMENTOV Z ANALIZO SLIK OPTICAL GRANULOMETRY OF COARSE AGGREGATES AND SEDIMENTS

Maja Matič¹, Nejc Bezak^{1,*}, Matjaž Mikoš¹

¹ Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Jamova 2, Ljubljana, Slovenija

Izvleček

Za določanje zrnivosti materiala se namesto klasičnih postopkov, kot je sejalna analiza, lahko uporabi tudi analiza slik. Podatek o zrnivosti je v vodarski stroki pomemben za različne praktične aplikacije, kot so izračun premestitvene zmogljivosti v vodotokih, načrtovanje hidrotehničnih objektov ali modeliranje drobirskih tokov. Testirali smo programa WipFrag in Basegrain, in sicer na primeru skalnega podora Belca in prodišča Save Dolinke pri Mojstrani. V obeh primerih smo posneli več slik z različnih višin, izvedli smo tudi sejalno analizo odvzetih vzorcev. Rezultate obeh programov za analizo slik smo primerjali z rezultati sejalne analize. Rezultati so pokazali, da je program WipFrag dal bolj primerljive rezultate s sejalno analizo. Program WipFrag je dal nekoliko boljše rezultate v primeru skalnega podora Belca kot v primeru rečnega prodišča. Program Basegrain je po drugi strani v obeh primerih dal podobno primerljive rezultate. Oba programa sta v večini primerov podcenila velikosti zrn v primerjavi z rezultati sejalne analize. V nekaterih primerih so relativne razlike znašale tudi blizu 100 %. Po drugi strani pa izbrani statistični test ni pokazal na statično značilno razliko med rezultati sejalne analize in rezultati analize slik v obeh programih. Optimalne rezultate analiz slik smo pridobili na podlagi slik, posnetih s stojne višine okrog 1,5–2 m, zato predlagamo, da se slike kamenih agregatov, erozijskega drobirja in rečnih sedimentov za namene določanja njihove zrnovostne sestave zajemajo z višine okoli desetkratnika maksimalnega premera analiziranega materiala.

Ključne besede: analiza slik, WipFrag, Basegrain, sejalna analiza, agregati, sedimenti, določitev zrnivosti.

Abstract

In order to determine the granularity of the material, image analysis may be used instead of traditional methods such as sieving. Data on granulometry is important in the water management sector for several practical applications, such as calculation of sediment transport capacity in watercourses, design of hydraulic structures, or modeling of debris flows. The WipFrag and Basegrain programs were tested on the case study of the Belca rockfall and the Sava Dolinka River's gravel bar near the village of Mojstrana. In both cases, multiple images were taken from different heights and sieve analysis was performed. The results of both programs were compared with the results of the sieving analysis. The results showed that WipFrag yielded more comparable results with the sieving analysis than Basegrain. WipFrag gave slightly better results in the case of the Belca rockfall than in the case of the river gravel bar. The Basegrain program, on the other hand, produced similarly comparable results in both case studies. In most cases, both programs underestimated the grain size compared

* Stik / Correspondence: nejc.bezak@fgg.uni-lj.si

© Matič M. et al.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0.](#)

© Matič M. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – NonCommercial – ShareAlike 4.0 Licence.](#)

to the results of the sieving analysis. In some cases, the relative differences were close to 100%. On the other hand, the selected statistical test did not show a statistically significant difference between the results of the sieving analysis and the results of the image analysis in both of the programs. Optimal image analysis results were obtained from images taken from the height of about 1.5-2 m, which means that we suggest that photos of aggregates, fluvial sediments, and erosion material should be taken from a height of approximately ten times the maximum grain size.

Keywords: analysis of digital images, WipFrag, Basegrain, sieve analysis, aggregate, sediments, determination of granularity.

1. Uvod

Informacija o količini in zrnavostni sestavi aktivnih rečnih sedimentov ali odloženih naplavin (aluvija) je pomembna pri načrtovanju in izvajanju ukrepov urejanja voda kot tudi zato, ker so sedimenti kot gradbeni material (mineralni agregati) pomembna surovina v gradbeništvu (Mikoš, 2017). Tako je ob količinah poznavanje zrnavostne sestave rečnih sedimentov na primer pomembno za določanje premestitvene zmogljivosti vodotokov (npr. Mikoš et al., 2002a; Mikoš et al., 2002b), dimenzioniranje zaplavnih hidrotehničnih objektov (npr. Piton in Recking, 2015), preučevanje in modeliranje gibanja drobirskih tokov (npr. Sodnik, 2009). Izvedba sejalne analize (običajno v laboratoriju) zahteva fizični odvzem vzorca na terenu, prevoz vzorca v laboratorij ter izvedbo sejalne analize z ustrezno laboratorijsko opremo za analizo mineralnih agregatov (npr. Gilson Company, 2019) – pogosto se zahteva atestirana in standardizirana laboratorijska oprema (SIST EN 932-5:2012; ASTM C-136:2014).

Razvitih je bilo precej alternativnih metod za določanje zrnivosti sedimentov, predvsem za grobe plavine v hudournikih in strmih vodotokih. Najbolj razširjena je Wolmanova metoda (1954) oziroma metoda štetja zrn plavin (Mikoš, 1989). Na podlagi te metode se je razvilo veliko postopkov; Bunte et al. (2009) navaja preko 30 različnih postopkov, ki temeljijo na vzorcu vsaj 100 zrn plavin, odvzetih pod linijo v smeri vodnega toka. Tovrstni terenski postopki za analizo zrnivosti so sicer enostavni in nezamudni, a tudi ne popolnoma natančni, saj analizirajo krovni sloj. V primeru vertikalnega razslojevanja in oblikovanja krovnega sloja, ki je bolj grob od svoje podlage, moramo to dejstvo upoštevati in za oceno zrnivosti celote uporabiti še

druge metode preračunavanja in kombiniranja zrnivosti podlage krovnega sloja, kot je to predlagal Fehr (1987).

Zato se je v zadnjih letih povečala uporaba različnih alternativnih metod (npr. Sulaiman et al., 2014; Cislaghi et al., 2016); eden izmed teh je določanje zrnivosti plavin na podlagi analize slik, angl. »photo sieving«. Obstajajo različna programska orodja, ki omogočajo določanje zrnivosti na podlagi posnete fotografije. V vseh primerih gre za analizo zrnivosti krovnega sloja, saj ne vidimo v podlago. Trije primeri takšnega programskega orodja so programi Basegrain (Basegrain, 2019), WipFrag (Wipware, 2019) in Split-Desktop (Split-Desktop, 2019) (Babaeian et al., 2018). Ti programi se precej razlikujejo, saj so bili eni recimo razviti za uporabo v kamnolomih kot orodje za načrtovanje in kontrolo uspešnosti miniranja za pridobivanje kamenega agregata (Maerz et al., 1996; Elahi & Hosseini, 2017), drugi pa za določanje zrnivosti rečnih sedimentov (proda) (Langhammer et al., 2017).

Glavni cilj prispevka je torej preveriti, ali izbrana programa WipFrag in Basegrain nudita zanesljive podatke o zrnivosti grobih sedimentov, tj. primerljive z rezultati klasične (mehanske) sejalne analize (Matič, 2019). Testirani sta bili naslednji dve hipotezi (Matič, 2019): (i) oba programa nudita primerljive rezultate s sejalno analizo in (ii) višina zajema slike (višina slikanja) ima na rezultate določanja zrnivosti na podlagi analize slik manjši oz. zanemarljiv vpliv.

2. Metode in podatki

Za namen testiranja obeh hipotez sta bila na porečju reke Save izbrana dva testna primera (skalni podor

Belca in prodišče Save Dolinke pri Mojstrani), ki sta zanimiva za vodarsko stroko:

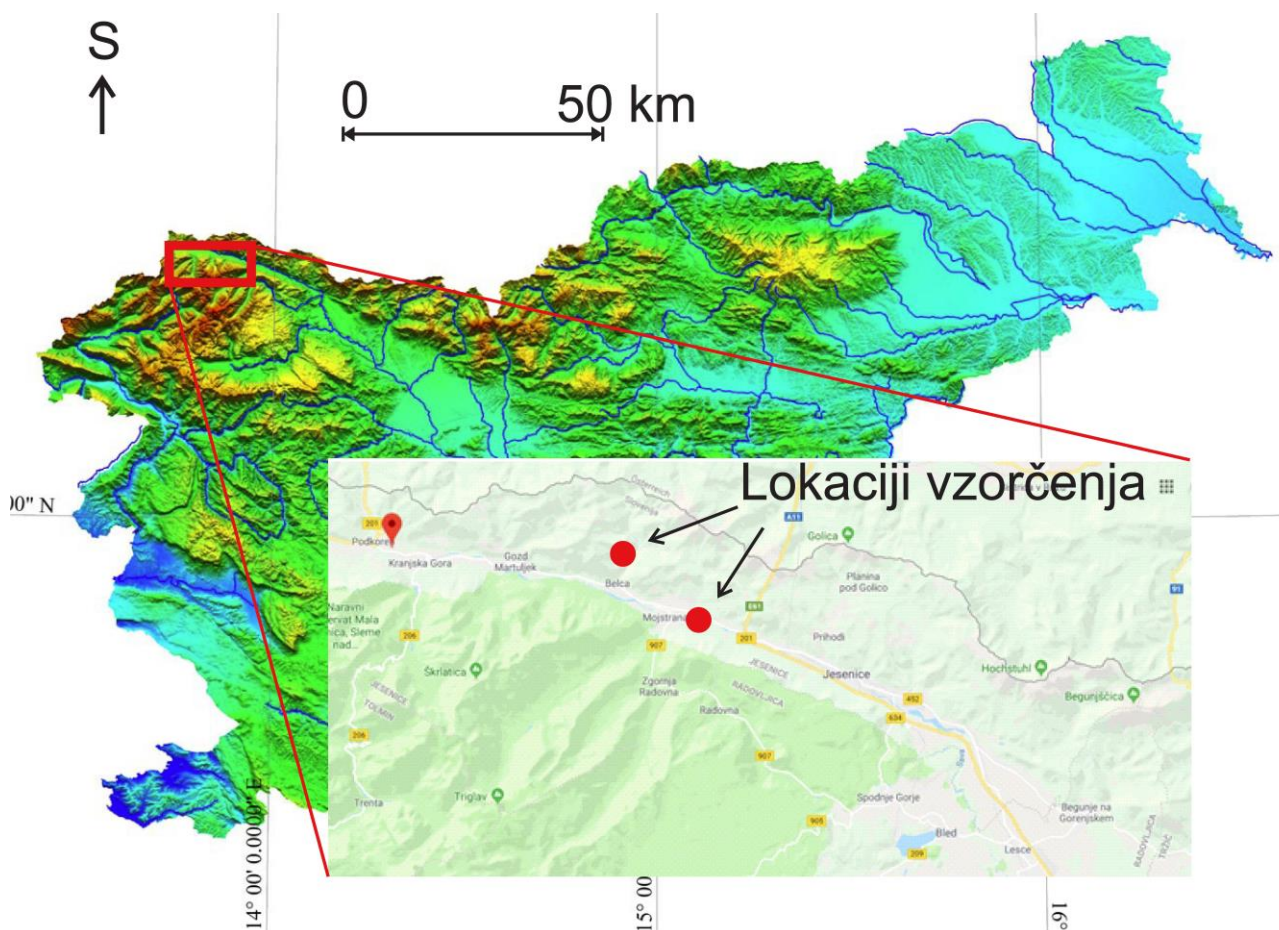
- skalni podor Belca zaradi nenadnega povečanega dotoka grobega in nezaobljenega drobirja po hudourniku Belca v Savo Dolinko in
- prodišče Save Dolinke pri Mojstrani, ker deluje kot naravni prodni žep in zadržuje dotekajoče viške rečnih plavin iz zaledja Save Dolinke nad Mojstrano v njen odsek proti Jesenicam in v akumulacijsko jezero hidroelektrarne Moste.

Za vsak testni primer je bilo na različnih višinah najprej posnetih več slik – s fotoaparatom v prenosnem telefonu (model Huawei p20 pro, barvni senzor 40 MP, velikost senzorja 1/1,7", optika LEICA, zaslonka f/1,8, goriščna razdalja 27 mm) pri različnih stojnih višinah snemalca in z

letalnikom (model DJI Phantom 4 pro plus, barvni senzor 20 MP, velikost senzorja 1", zaslonka f/2,8, goriščna razdalja 24 mm) z različnih višin leta. Nato smo na mestu fotografiranja za potrebe sejalne analize odvzeli vzorec materiala in ga laboratorijsko analizirali z namenom določitve njegove zrnovostne sestave. Različne vzorce smo nato primerjali; uporabili smo tudi statistične teste, da smo ugotovili, ali med vzorci obstaja statistično značilna razlika.

2.1 Testna primera

Z namenom določitve dveh različnih primerov, ki bi oba lahko bila primerna za uporabo v vodarski oz. geotehnični stroki, sta bila določena testna primera, ki sta okvirno prikazana tudi na sliki 1.



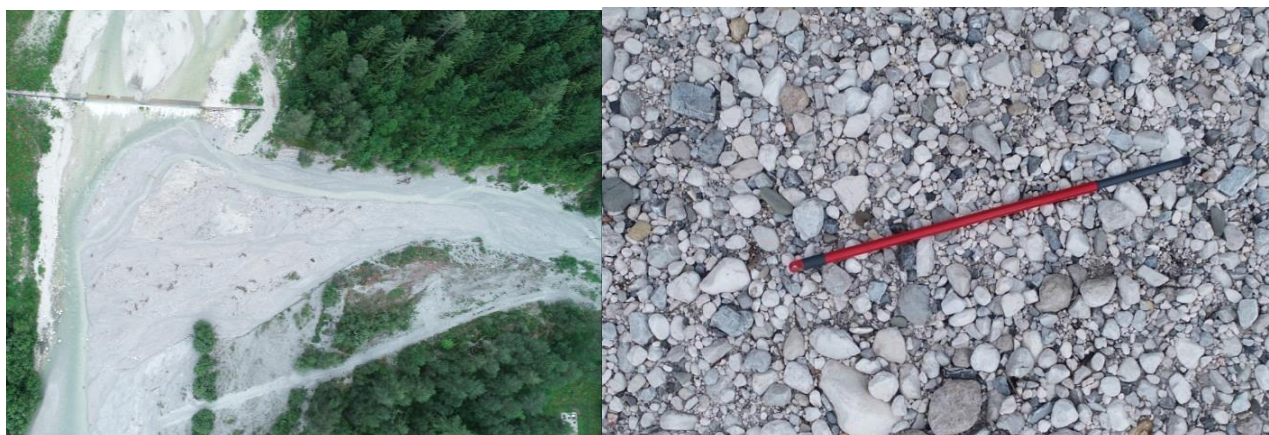
Slika 1: Lokaciji vzorčenja za dva testna primera v dolini Save Dolinke na severozahodnem delu Slovenije (povzeto po Matič, 2019).

Figure 1: Location of field sampling for two test cases in the valley of the Sava Dolinka River (NW Slovenia) (Adopted from Matič, 2019).



Slika 2: Skalni podor Belca – pogled gorvodno (povzeto po Matič, 2019).

Figure 2: Belca rockfall – upstream view (Adopted from Matič, 2019).



Slika 3: Leva slika: sotočje Belce in Save Dolinke. Desna slika: prodišče Save Dolinke pri Mojstrani (povzeto po Matič, 2019).

Figure 3: Left photo: confluence of the Belca and Sava Dolinka Rivers. Right photo: gravel bar along Sava Dolinka River near Mojstrana (Adopted from Matič, 2019).

Prvi primer je skalni podor Belca (slika 2), ki se je zgodil v vasi Belca v občini Kranjska Gora dne 29. 10. 2018 med oziroma po intenzivnem padavinskem dogodku (Matič, 2019). Na omenjenem območju so se sicer tudi že v preteklosti dogajali veliki masni premiki, npr. izbruh hudournika Belca leta 1953 (Pintar, 1977), zemeljski plazovi 1990 in 2014 ter

4. 2. 2018 skalni podor (Žabota et al., 2018; Matič, 2019). V tem primeru je poznavanje zrnivosti materiala pomembno za načrtovanje morebitnih ukrepov za zmanjševanje ogroženosti: npr. lovilne mreže za manjše lokalne podore, zaplavne hudourniške pregrade za zaustavitev transporta dotekajočega grobega drobirja z območja podora,

saj je območje destabilizirano in lahko pričakujemo novo krušenje pobočja in nove skalne podore (Kostevc, 2018; Lazar et al., 2018).

Kot drugi testni primer je bilo izbrano prodišče Save Dolinke pri Mojstrani (slika 3; Matič, 2019). V tem primeru je poznavanje zrnivosti na primer pomembno za izračun premestitvene zmogljivosti vodotoka, ki je lahko eden izmed vhodnih podatkov pri urejanju vodotokov oz. načrtovanju hidrotehničnih objektov.

V obeh primerih so bile slike posnete s ptičje perspektive na naslednjih višinah: 3,5, 2, 1,5, 1, 0,75, 0,5 in 0,3 m (Matič, 2019). Pri vseh primerih je bil na sliko dodan tudi predmet z znanimi dimenzijami. V primeru skalnega podora Belca so bile sicer posnete tudi fotografije z večje višine (25 m, 10 m) z uporabo brezpilotnega letalnika, a so se kasneje v procesu analize slik izkazale kot neustrezne, saj na njih ni bilo mogoče natančno izvesti analize slik zaradi premajhne zrnivosti materiala ob tako veliki izbrani višini snemanja (Matič, 2019). Zaradi tega ti primeri v tem prispevku niso prikazani.

2.2 Program WipFrag

Prvi izmed dveh programov, ki smo ju testirali, je program WipFrag (Wipware, 2019). Razvoj programa se je začel že leta 1986, ko je podjetje WipWare (North Bay, Ontario, Kanada) s tem programom postalo vodilno podjetje na področju določanja zrnivosti fragmentiranih materialov s pomočjo analize slik. WipFrag je zato dostopen kot plačljiv program ter je predvsem namenjen za uporabo v rudarski, gozdarski in gradbeni (določanje zrnivosti agregatov) industriji (Wipware, 2019). Program je še posebej uporaben za primere, kot je določanje zrnivosti v kamnolomih.

Sam postopek uporabe programa, ki ga je opisala Matič (2019), je precej preprost, saj celotna analiza poteka v štirih preprostih korakih. Začetne rezultate programa lahko tudi ročno popravimo, kar smo v okviru našega dela tudi storili, kadar smo opazili očitno napako pri zaznavanju kontur. Pri samem zajemu slike je na primer treba paziti na ustrezno osvetlitev, prisotnost delcev, ki niso del materiala,

ki ga analiziramo, itd. (Matič, 2019). Eden glavnih rezultatov analize slik je zrnivostna sestava materiala, ki je podana v obliki zrnivostne krivulje (Matič, 2019).

2.3 Program Basegrain

Basegrain je v primerjavi s programom WipFrag brezplačni program in je namenjen predvsem določanju zrnivostne sestave rečnih sedimentov (npr. proda) (Basegrain, 2019). Prva verzija (1.0) programa je izšla leta 2011, zadnja dostopna verzija pa leta 2015 (Basegrain, 2019). V primerjavi s programom WipFrag tako Basegrain predpostavi eliptično obliko zrn in kot enega izmed rezultatov poda tudi zrnivost po Fehrovem modelu (Bunte in Abt, 2001; Detert in Weitbrecht, 2013). Sam postopek določanja zrnivostne sestave v programu Basegrain je nekoliko bolj kompleksen kot postopek v programu WipFrag (Matič, 2019). Tudi sicer Basegrain omogoča izbiro oz. določitev številnih parametrov, ki vplivajo na rezultate analiz, med njimi npr. parametrov, ki nastopajo tudi v Fehrovem modelu za preračunavanje in sestavljanje krivulj zrnivosti grobozrnatih sedimentov v gorskih vodotokih (Fehr, 1987). Podobno kot pri programu WipFrag je tudi v primeru programa Basegrain mogoče ročno združevati in razdruževati posamezna zrna na podlagi rezultata programa. Tudi v tem primeru smo pri analizi slik ročno popravili očitne napake. Poudariti moramo, da program nima možnosti, ki bi omogočala razveljavitev prejšnjih korakov.

2.4 Sejalna analiza

Rezultate obeh programov smo primerjali tudi z rezultati sejalne analize, pri čemer smo za sejanje uporabili vibracijski stresalnik (Gilson company, 2019). Uporabljene so bile standardizirane velikosti sit: 100 mm, 75 mm, 63 mm, 50 mm, 31,5 mm, 25 mm, 16 mm, 12,5 mm, 8 mm, 4 mm in 2,8 mm (Matič, 2019). Na podlagi rezultatov sejalne analize in analize slik smo določili značilna zrna d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{70} in d_{90} . Te velikost zrn smo nato uporabili za primerjavo različno odvzetih vzorcev.

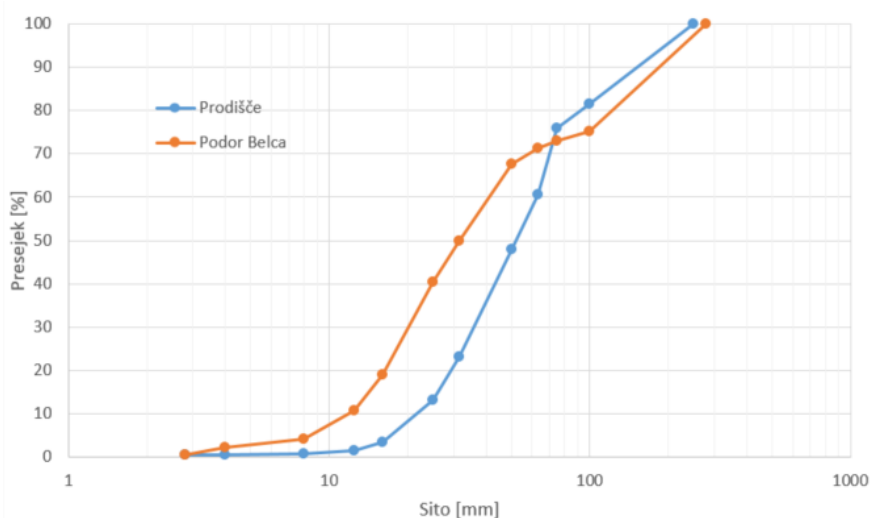
2.5 Mann-Whitneyjev test

Za primerjavo različnih vzorcev (en vzorec je bil sestavljen iz vrednosti d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{70} in d_{90}) smo uporabili neparametrični Mann-Whitneyjev test, kjer testiramo ničelno hipotezo, ki pravi, da testirana vzorca pripadata isti porazdelitvi (Plečko, 2015). Podrobnejše informacije o uporabljenem testu sta podala Mann and Whitney (1947). Ker sta imela oba analizirana vzorca po pet elementov, je bila kritična vrednost testa za naš primer enaka 2 pri

izbrani stopnji značilnosti 5 % (Mann and Whitney, 1947; Plečko, 2015).

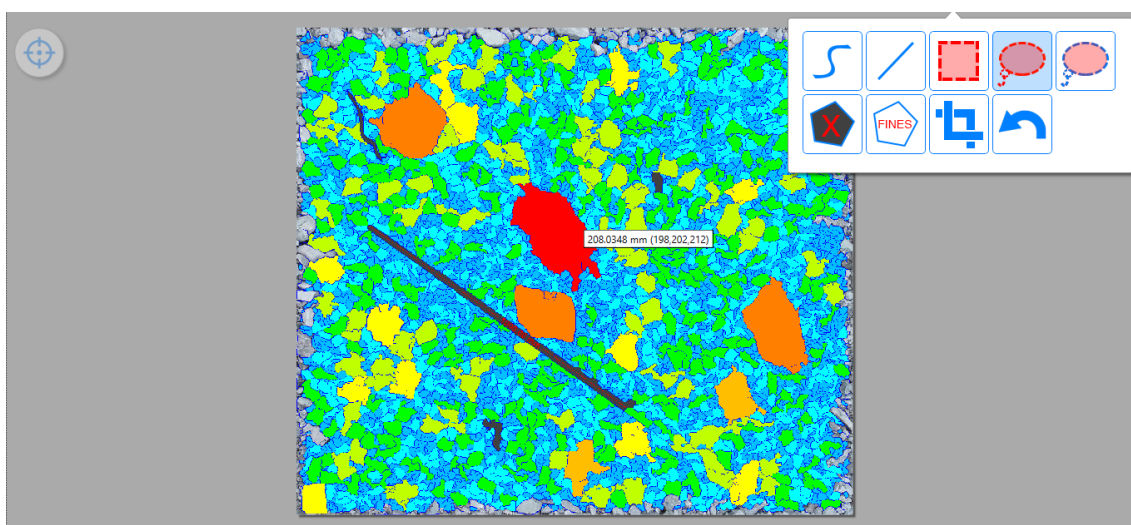
3. Rezultati in razprava

V prvem koraku smo na obeh testnih primerih najprej posneli fotografije z različnih višin, nato smo na terenu odvzeli površinski sloj materiala in ga nato tudi laboratorijsko analizirali. Slika 4 prikazuje rezultate sejalne analize za oba v naravi odvzeta vzorca (skalni podor Belca in prodišče Save Dolinke pri Mojstrani).



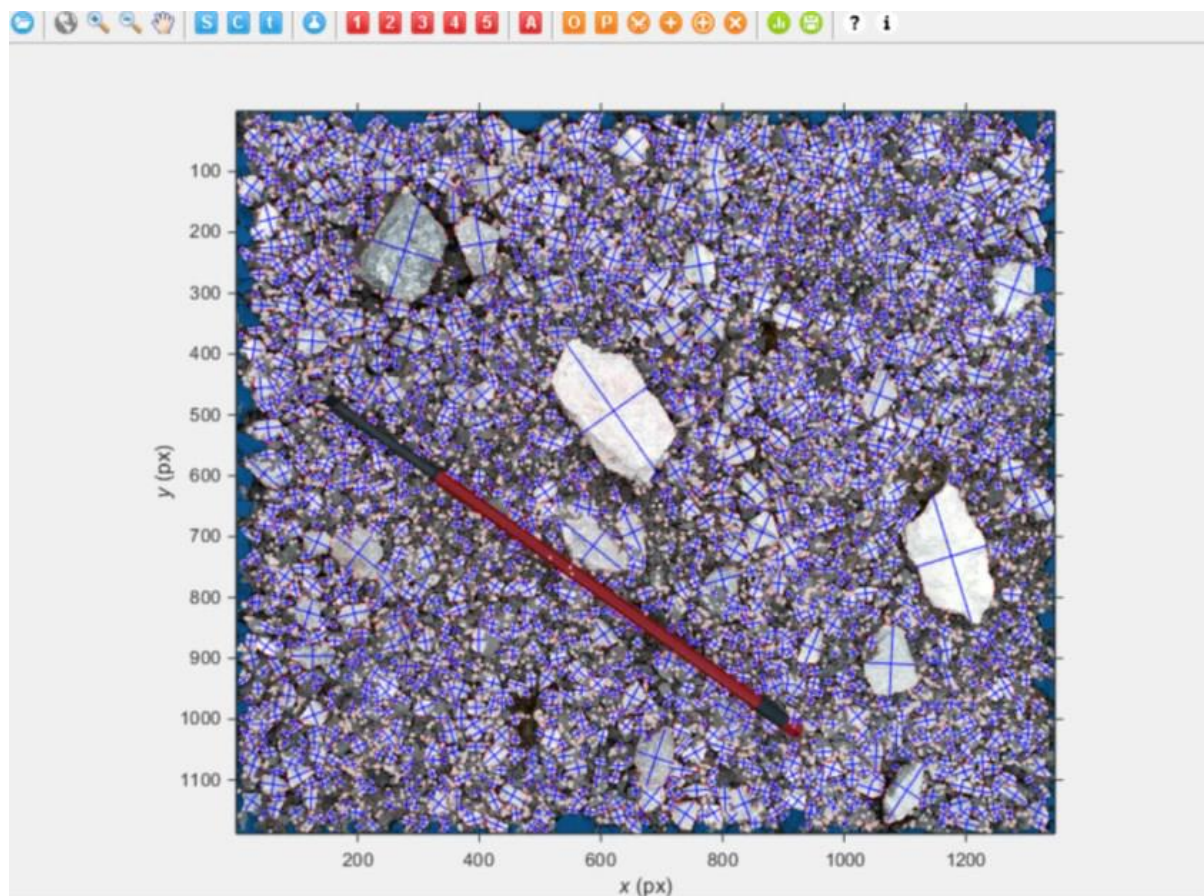
Slika 4: Rezultati sejalne analize za oba odvzeta vzorca (povzeto po Matič, 2019).

Figure 4: Sieve analyses results for both samples (Adopted from Matič, 2019).



Slika 5: Primer rezultatov analize v programu WipFrag (skalni podor Belca; višina slike 3,5 m) – barve ponazarjajo velikost delcev (povzeto po Matič, 2019).

Figure 5: An example of the analysis results in the WipFrag (Belca rockfall; photo height 3.5 m) – colours indicate grain size (Adopted from Matič, 2019).



Slika 6: Primer rezultatov analize v programu Basegrain (skalni podor Belca; višina slike 3,5 m) (povzeto po Matič, 2019).

Figure 6: An example of the analysis results in the Basegrain (Belca rockfall; photo height 3.5 m) (Adopted from Matič, 2019).

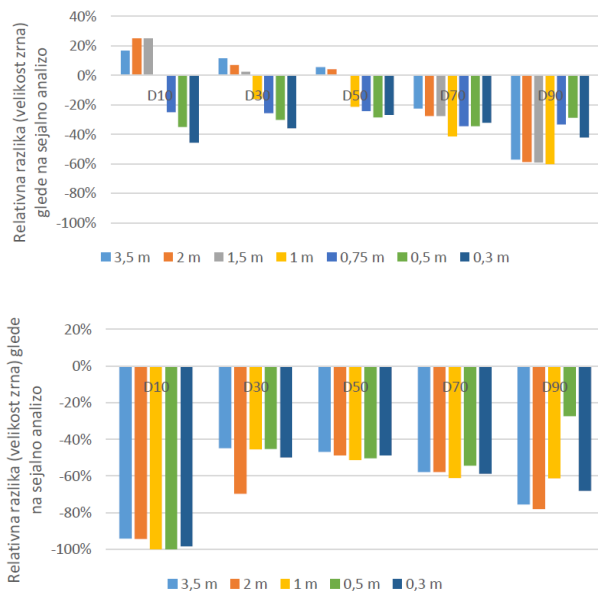
3.1 Skalni podor Belca

Za prvi testni primer (skalni podor Belca) smo torej primerjali rezultate sejalne analize, kjer smo se osredotočili na zrna d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{70} in d_{90} , z rezultati analize slik v programu WipFrag in Basegrain. Sliki 5 in 6 prikazujeta postopek analize slik v programu WipFrag in Basegrain. Pri tem lahko vidimo, da WipFrag zazna celotno konturo (obris) delcev, medtem ko Basegrain predpostavi eliptično obliko zrn, saj je bil razvit za (zaobljene) rečne plavine – njegova uporaba za ogleta in nezaobljena zrna je že zato pogojna.

Slika 7 prikazuje primerjavo rezultatov analize slik v programih WipFrag in Basegrain z rezultati sejalne analize. Opazimo lahko, da so relativne razlike med sejalno analizo in rezultati v WipFrag manjše za manjša zrna kot za večja zrna. Razlog bi lahko bil, da na vrednost d_{90} v primeru sejalne

analize v veliki meri vplivajo dimenzije maksimalnega zrna, ki je lahko v primeru analize slik postavljeno tako, da se iz same slike ne da natančno določiti dejanskih dimenzij zrn, saj so lahko ta zrna delno zakopana ali zakrita z drugimi zrnji. Poleg tega vidimo, da so relativne razlike v primeru slik, posnetih z večjih višin, manjše kot v primeru slik, posnetih z višine 0,3 m. Pri tej višini namreč ne moremo več z eno sliko zajeti celotnega območja, ki ga želimo analizirati, kar pomeni, da smo morali za zajem dovolj velike površine analizirati štiri slike. Na sliki 7 so tako prikazane povprečne vrednosti teh štirih slik. Na posamezni sliki je tako precej manjše število zrn kot na slikah z večjih višin, poleg tega pa se – če pri zajemanju slik nismo pozorni, da se slike ne prekrivajo –, lahko določena zrna na različnih slikah pojavijo večkrat. Relativne razlike med zrnji velikosti d_{30} in d_{50} so za slike, posnete na višinah 3,5, 2 in 1,5 m, v

primerjavi s sejalno analizo v razponu do največ 12 %. Sereshki et al. (2016) so pri primerjavi različnih metod analize slik (na primer programa Split Desktop in GoldSize) ugotovili, da so razlike med rezultati analize slik in dejanskimi velikostmi zrn v nekaterih primerih lahko zelo velike (npr. večje, kot so prikazane na sliki 7).



Slika 7: Primerjava rezultatov analize v programu WipFrag (zgornja slika) in Basegrain (spodnja slika) za skalni podor Belca glede na sejalno analizo. Prikazani so rezultati za zrna d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{70} in d_{90} . Y-os prikazuje relativno razliko v % (povzeto po Matič, 2019).

Figure 7: Comparison of the WipFrag (upper photo) and Basegrain (bottom photo) results with the sieve analysis for the Belca rockfall. Results for the d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{70} , and d_{90} are shown. Y-axis shows relative difference in % (Adopted from Matič, 2019).

Slika 7 prav tako prikazuje primerjavo med rezultati v programu Basegrain in sejalno analizo. Opazimo, da so relativne razlike v primerjavi s programom WipFrag precej večje. To pomeni, da so relativne razlike praktično v vseh primerih večje od 40 %, za manjša zrna celo blizu 100 %. Stähly et al. (2017) so primerjali dejanske dimenzije erozijskega drobirja z dimenzijami, ki so izhajale iz sejalne analize, kjer so bila uporabljena sita s kvadratnimi

odprtinami. Avtorji so ugotovili, da so tako določene dimenzije materiala za faktor 0,83–0,86 manjše kot dejanske dimenzije.

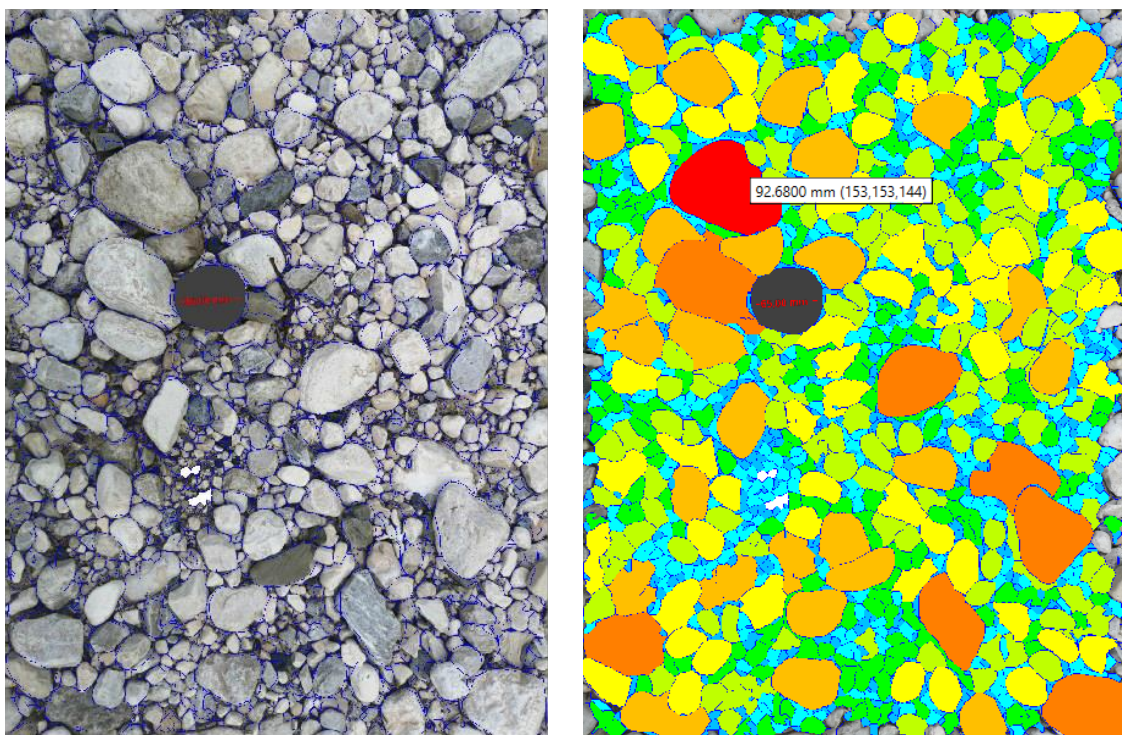
Podobno so ugotovili tudi za rezultate analize slik v programu Basegrain, iz česar je sledil zaključek, da sta sejalna analiza in analiza slik medsebojno primerljivi (Stähly et al., 2017). Rüter et al. (2013) pa so primerjali rezultate v programu Basegrain z alternativno fotogrametrično metodo in ugotovili, da sta obe metodi dali primerljive rezultate, čeprav so bile razlike v nekaterih primerih precej velike, kar ponazarjajo tudi slike, objavljene v navedeni literaturi.

Na podlagi vseh posnetih fotografij in rezultatov analiz smo vse vzorce (d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{70} in d_{90}) z uporabo Mann-Whitneyjevega testa primerjali z rezultati sejalne analize (Matič, 2019). Ugotovili smo, da v nobenem primeru ničelne hipoteze ne moremo zavrniti z izbrano stopnjo zaupanja, kar pomeni, da med obema testiranima vzorcema ni bilo statistično značilnih razlik.

3.2 Prodišče Save Dolinke pri Mojstrani

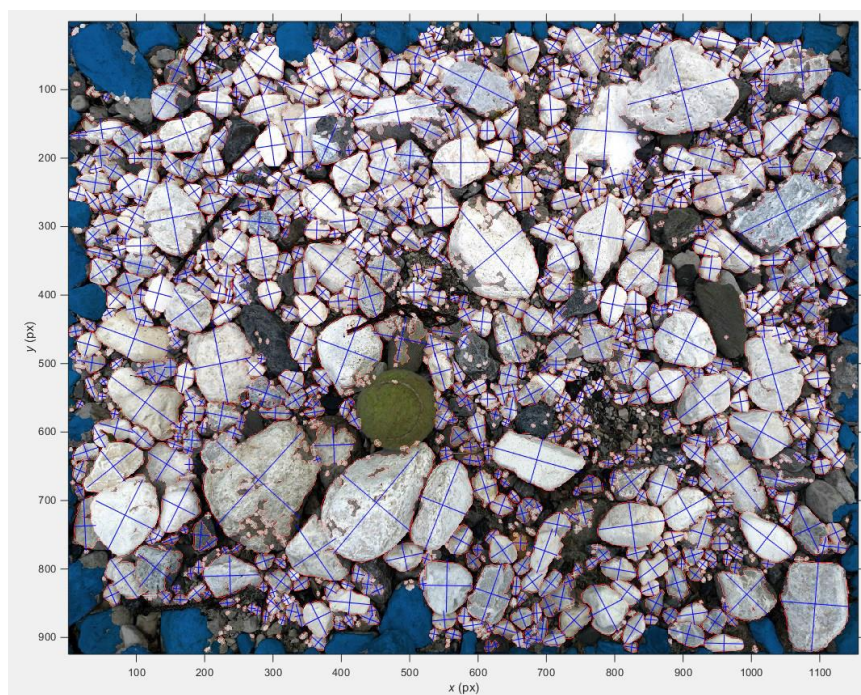
Nato smo podobne analize izvedli tudi za drugi testni primer, prodišče Save Dolinke pri Mojstrani. Sliki 8 in 9 prikazujeta rezultate analize slik, posnetih z višine 0,5 m, v programih WipFrag in Basegrain. Slika 10 pa prikazuje relativne razlike med sejalno analizo in analizo slik za zrna d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{70} in d_{90} v primeru obeh testiranih programov. V primerjavi s skalnim podorom Belca je program WipFrag dal nekoliko slabše rezultate, saj so bile relativne razlike večje – vzrok je v dejstvu, da program Basegrain predpostavlja zrna eliptične oblike.

Za zrna d_{30} , d_{50} , d_{70} in d_{90} so rezultati obeh programov relativno primerljivi, WipFrag pa je kljub temu dal rezultate, ki so bili bolj primerljivi z rezultati sejalne analize. Relativna napaka pri zrnih velikosti d_{10} je v obeh testnih primerih za program Basegrain največja. V določeni meri bi razlike verjetno lahko zmanjšali z dodatnim ročnim popraviljem majhnih delcev v programskem orodju Basegrain.



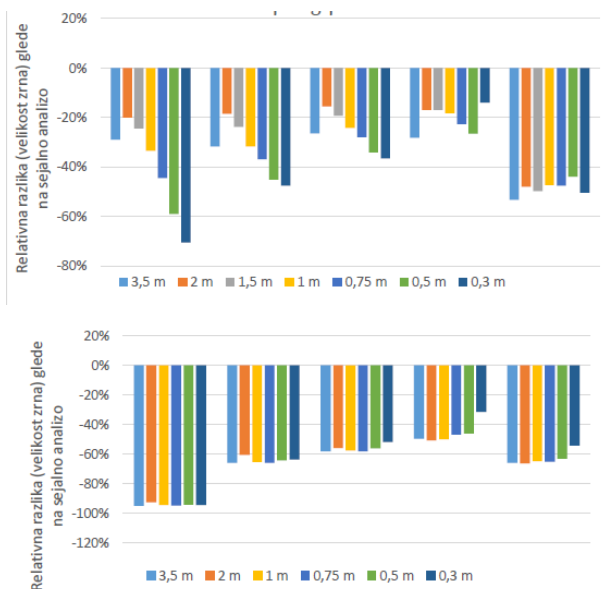
Slika 8: Primer rezultatov analize v programu WipFrag – barve na desni sliki ponazarjajo velikost zrn (prodišče; višina slike 0,5 m) (povzeto po Matič, 2019).

Figure 8: An example of the analysis results in the WipFrag – colours on the right photo indicate grain size (sediments bar; photo height 0.5 m) (Adopted from Matič, 2019).



Slika 9: Primer rezultatov analize v programu Basegrain (prodišče; višina slike 0,5 m) (povzeto po Matič, 2019).

Figure 9: An example of the analysis results in the Basegrain (gravel bar; photo height 0.5 m) (Adopted from Matič, 2019).

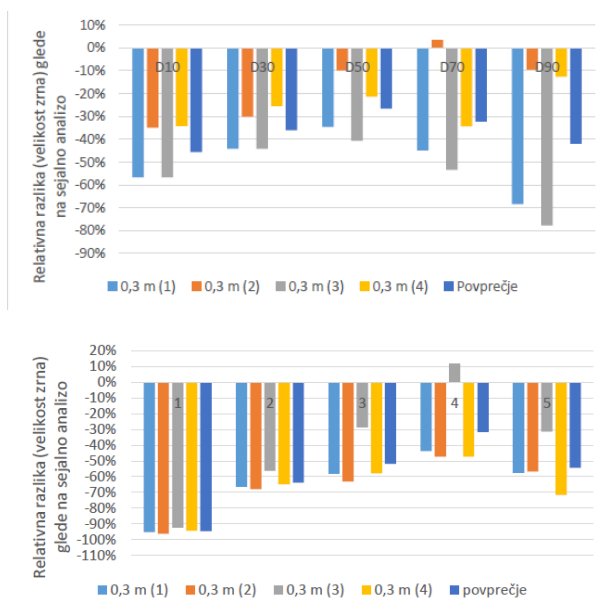


Slika 10: Primerjava rezultatov analize v programu WipFrag (zgornja slika) in Basegrain (spodnja slika) za prodišče glede na sejalno analizo. Prikazani so rezultati za zrna d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{70} in d_{90} . Y-os prikazuje relativno razliko v % (povzeto po Matič, 2019).

Figure 10: Comparison of the WipFrag (upper photo) and Basegrain (bottom photo) results with the sieve analysis for the sediment bar. Results for the d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{70} , and d_{90} are shown. Y-axis shows relative difference in % (Adopted from Matič, 2019).

Primerjali smo tudi rezultate analize slik v primeru slikanja z manjših višin; slika 11 prikazuje slikanje z višine 0,3 m. Zanimalo nas je, kakšne so razlike med posameznimi slikami. Pri tem lahko vidimo, da so rezultati lahko precej odvisni od tega, katero sliko upoštevamo.

Podobno kot v primeru podora Belca tudi za prodišče v nobenem od primerov ničelne hipoteze testa nismo mogli zavrniti, kar pomeni, da glede na izbrani test med testiranima vzorcema ni bilo statistično značilne razlike.



Slika 11: Primerjava rezultatov analiz v programu WipFrag (zgornja slika) in Basegrain (spodnja slika) za prodišče glede na slike posnete z višine 0,3 m. Prikazani so rezultati za zrna d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{70} in d_{90} . Y-os prikazuje relativno razliko v % (povzeto po Matič, 2019).

Figure 11: Comparison of the WipFrag (upper photo) and Basegrain (bottom photo) results for the sediment bar case for the photo height 0.3 m. Results for the d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{70} , and d_{90} are shown. Y-axis shows relative difference in % (Adopted from Matič, 2019).

4. Zaključki

Prispevek prikazuje primerjavo dveh računalniških programov za analizo slik, ki omogočata določanje zrnavnostne sestave grobega kamnitega materiala v kamnolomih, grobega erozijskega drobirja v hudourniških območjih in grobega rečnega (naplavinkega) materiala, ter primerjavo rezultatov, ki jih dajeta programa, z rezultati klasične (mehanske) sejalne analize odvzetih vzorcev v laboratoriju. Primerjavo smo izvedli za dva testna primera, in sicer za skalni podor Belca in za prodišče Save Dolinke pri Mojstrani. Na podlagi rezultatov in razprave lahko zaključimo:

- Program WipFrag, ki je plačljiv (obstaja tudi akademska licenca) in bolj enostaven za uporabo kot Basegrain, je v splošnem dal bolj primerljive rezultate s sejalno analizo kot

program Basegrain. Za primer skalnega podora Belca, kjer je podorni material nezaobljen in grob, so bili rezultati najboljši. To je pričakovani rezultat, saj je bil program WipFrag razvit za analizo grobega kamenega agregata v kamnolomih, ki so izrazito ostrorobi in zahtevajo poseben algoritem za prepoznavanje kontur (obrisov) posameznih zrn.

- Po drugi strani so bili rezultati programa Basegrain slabši in v obeh testnih primerih primerljivi, čeprav je bil program razvit prav za določanje zrnivosti zaobljenih (pogosto vsaj približno eliptičnih) rečnih sedimentov na prodiščih.
- Z izbranim statističnim testom (Mann-Whitney) sicer med analiziranimi vzorci z uporabo izbranih kazalnikov (d_{10} , d_{30} , d_{50} , d_{70} in d_{90}) ni bilo mogoče zaznati statistično značilnih razlik, kar pomeni, da sta oba uporabljena programa dala rezultate, ki niso bili statistično značilno različni od rezultatov sejalne analize.
- Optimalne rezultate analiz slik smo pridobili na podlagi slik, posnetih z višine okrog 1,5–2 m. Slike, posnete z manjših višin (npr. 0,3 m), se niso izkazale za uporabne, ker je bilo na sliki zajetega premalo materiala, obenem ob zajemanju lahko pride tudi do delnega prekrivanja zajetih slik. Slike z višjih višin (npr. slike, posnete z brezpilotnim letalnikom z višine 20 m) pa za naša testna primera niso bile ustrezne, saj je bila velikost materiala na tako zajetih slikah premajhna. Lahko zaključimo, da je optimalna višina zajemanja slik odvisna od velikosti materiala, ki ga želimo zrnavostno analizirati.
- Tako predlagamo, da se slike kamenih agregatov, erozijskega drobirja in rečnih sedimentov za namene določanja njihove zrnavostne sestave zajemajo z višine okoli desetkratnika maksimalnega premera analiziranega materiala. Fotografiranje (zajemanje slik) lahko opravimo ročno s primerne stojne višine, v primeru grobozrnatega drobirskega materiala, kot so recimo pobočni gruščni ali odkladnine skalnih podorov, pa

uporabimo letalnike (drone) in izberemo ustrezno višino snemanja.

Zahvala

Avtorji se zahvaljujemo podjetju WipWare, ki je omogočilo nakup akademske različice programa WipFrag (različica 3.3, marec 2018) pod ugodnimi pogoji. Raziskava je potekala v okviru dela na raziskovalnem programu P2-0180 Vodarstvo in geotehnika, ki ga financira Agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS). Prva avtorica je raziskavo opravila v okviru samostojnega dela na magistrski nalogi na UL FGG.

Viri

ASTM International (2014). *C136/C136M-14 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. West Conshohocken, PA. Dostopno na: https://doi-org.nukweb.nuk.uni-lj.si/10.1520/C0136_C0136M-14

Babaeian, M., Ataei, M., Sereshki, F., Sotoudeh, F., Mohammadi, S. (2018). A new framework for evaluation of rock fragmentation in open pit mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* **12**(2), 325–336. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.11.006>.

Basegrain (2019). Dostopno na: <https://basement.ethz.ch/download/tools/basegrain.html> (pridobljeno 31. 8. 2019).

Bunte, K., R. Abt, S. (2001). Sampling Surface and Subsurface Particle-Size Distributions in Wadable Gravel – and Cobble-Bed Streams for Analyses in Sediment Transport, Hydraulics, and Streambed Monitoring. General Technical Report RMRS-GTR-74. Fort Collins, CO: USA. Dept. of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, str. 428. <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-74>.

Bunte, K., Abt, S.R., Potyondy, J.P., Swingle, K.W. (2009). Comparison of three pebble count protocols (EMAP, >PIBO, and SFT) in two mountain gravel-bed streams. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* **45**, 1209–1227.

Cislaghi, A., Chiaradia, E.A., Bischetti, G.B. (2016). A comparison between different methods for determining grain distribution in coarse channel beds. *International Journal of Sediment Research* **31**(2), 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.12.002>.

- Detert, M., Weitbrecht, V. (2013). User guide to gravelometric image analysis by Basegrain. 8.
- Elahi, A. T., Hosseini, M. (2017). Analysis of blasted rocks fragmentation using digital image processing (case study: limestone quarry of Abyek Cement Company). *International Journal of Geo-Engineering* 8: 16.
- Fehr, R. (1987). Geschiebeanalysen in Gebirgsflüssen: Umrechnung und Vergleich von verschiedenen Analyseverfahren. Mitteilungen Nr. 92, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Switzerland. Dostopno na: <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vaw-dam/documents/das-institut/mitteilungen/1980-1989/092.pdf>.
- Gilson Company. (2019). Dostopno na: <https://www.globalgilson.com/gilson-testing-screen> (pridobljeno 31. 8. 2019).
- Kostevc, M. (2018). Ocena ogroženosti naselja Belca pred drobirskim tokom. Unpublished diploma thesis. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, 62 p. (in Slovenian). Dostopno na: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=103165&lang=slv>.
- Langhammer, J., Lendzioch, T., Miříjovský, J., Hartvich, F. (2017). UAV-Based Optical Granulometry as Tool for Detecting Changes in Structure of Flood Depositions. *Remote Sensing* **9**(3), 240. <https://doi.org/10.3390/rs9030240>.
- Lazar, A., Beguš, T., Vulić, M. (2018). Monitoring of the Belca Rockfall. *Acta geotechnica Slovenica* **15**(2), 2–14. <https://doi.org/10.18690/actageotechslov.15.2.2-15.2018>
- Maerz, N. H., Palangio, T. C., Franklin, J. A. (1996). WipFrag image based granulometry system. V: Proceedings of the FRAGBLAST 5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Montreal, Quebec, Canada, 23-24 Aug., 1996, 91–99.
- Mann, H. B., Whitney, D. R. (1947). On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *The Annals of Mathematical Statistics*, **18**(1), 50–60.
- Matič, M. (2019). Primerjava dveh metod za analizo slik za določitev zrnivosti grobih agregatov in sedimentov. Unpublished master thesis. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 140 p. (in Slovenian). Dostopno na: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=110383&lang=slv>.
- Mikoš, M. (1989). Metode vrednotenja zrnavostnih združb plavin v naravnih vodotokih. *Gradbeni vestnik* **38**(7-8), 158–165. Dostopno na: <http://www.zveza-dgits.si/gradbeni-vestnik-7-8-1989>.
- Mikoš, M. (2017). Rečni sedimenti in mineralni agregati v gradbeništvu. *Gradbeni vestnik* **66**(12), 296–306. Dostopno na: <http://www.zveza-dgits.si/gradbeni-vestnik-december-2017>.
- Mikoš, M., Petkovšek, G., Štravs, L., Brilly, M. (2002a). Prodna bilanca povodja reke Koritnice – 1. Letna prodonosnost. *Gradbeni vestnik* **51**(11), 316–321. Dostopno na: <http://www.zveza-dgits.si/gradbeni-vestnik-11-2002>.
- Mikoš, M., Petkovšek, G., Štravs, L., Brilly, M. (2002b). Prodna bilanca povodja reke Koritnice – 2. Morfološke spremembe. *Gradbeni vestnik* **51**(12), 339–345. Dostopno na: <http://www.zveza-dgits.si/gradbeni-vestnik-12-2002>.
- Pintar, J. (1977). Metodološka zasnova analize povirij voda s primerjalno presojo primernosti površin za smučišča v povirju Pišnice. Ljubljana, Podjetje za urejanje hudournikov, LIZ inženiring, 94 str.
- Piton, G., Recking, A. (2015). Design of Sediment Traps with Open Check Dams. I: Hydraulic and Deposition Processes. *Journal of Hydraulic Engineering* **142**(2), 04015045. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001048](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001048).
- Plečko, J. (2015). Analiza tedenske razporeditve padavin za izbrane padavinske postaje v Sloveniji. Unpublished diploma thesis. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 141 p. (in Slovenian). Dostopno na: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=107957>.
- Rüther, N., Huber, S., Spiller, S., Aberle, J. (2013). Verifying a photogrammetric method to quantify grain size distribution of developed armor layers. Proceedings of 2013 IAHR Congress, Tsinghua University, Beijing.
- Sereshki, F., Hoseini, S. M., Ataei, M. (2016). Blast fragmentation analysis using image processing. *International Journal of Mining and Geo-Engineering* **50**(2), 211–218. <https://doi.org/10.22059/ijmge.2016.59831>.
- SIST EN 932-5:2012 (2012). Tests for general properties of aggregates – Part 5: Common equipment and calibration = Preskusi splošnih lastnosti agregatov – 5. del: Splošne zahteve za opremo in kalibracijo. Slovenski inštitut za standardizacijo.
- Sodnik, J. (2009). Matematično modeliranje drobirskih tokov in priprava podrobnih kart nevarnosti. Unpublished master thesis. Univerza v Ljubljani,

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 218 p. (in Slovenian).

Split-Desktop. (2019). Split-Desktop Software. Dostopno na: <https://www.spliteng.com/products/split-desktop-software/> (pridobljeno 31. 8. 2019).

Stähly, S., Friedrich, H., Detert, M. (2017). Size Ratio of Fluvial Grains' Intermediate Axes Assessed by Image Processing and Square-Hole Sieving. *Journal of Hydraulic Engineering* **143(6)**. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001286](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001286).

Sulaiman, M. S., Sinnakaudan, S. K., Ng, S. F., Strom, K. (2014). Application of automated grain sizing technique (AGS) for bed load samples at Rasil River: A case study for supply limited channel. *Catena* **121**, 303–343. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.05.013>

WipWare (2019). Sampling and Analysis Guide. Dostopno na: <http://wipware.com/products/WipFrag/> (pridobljeno 31. 8. 2019).

Wolman, M. G. (1954). A method of sampling coarse river-bed material. *EOS, Transactions American Geophysical Union* **35**, 951–956.

Žabota, B., Jeršič, T., Kobal, M. (2018). Analiza skalnega podora Belca z uporabo brezpilotnega letalnika. V: Zbornik 29. Mišičevega vodarskega dneva, 95–100. Dostopno na: <http://www.mvd20.com/LETO2018/R12.pdf>.