

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Studenti: Antonija Cikojević, Filip Ferenčak, Josip Husajina

POBOLJŠANJE KARAKTERISTIKA RIJEČNOG PRAGA MODIFIKACIJOM LUČNOG OBLIKA



Zagreb, 2017.

University of Zagreb
Faculty of civil engineering

Students: Antonija Cikojević, Filip Ferenčak, Josip Husajina

IMPROVEMENT OF THE CHARACTERISTICS OF THE RIVER THRESHOLD BY MODIFYING THE ARCHED SHAPE



Zagreb, 2017.

Ovaj rad je izrađen u Zavodu za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Gorana Gjetvaja i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2016./2017.

Sadržaj:

1. Uvod	1
2. Prag	2
2.1. Režim tečenja preko praga.....	5
3. Makroskopski pogled na prag.....	8
3.1. Općenito o luku.....	8
3.2. Luk kao monolitni prag	11
4. Mikroskopski pogled na uklještenost krune	16
4.1. Uklještenje u tlocrtnom pogledu	17
4.2. Uklještenje u poprečnom presjeku.....	21
4.3. Uklještenje u trodimenzionalnom pogledu	25
4.4. Mehanizam rušenja	26
5. Fizikalni model.....	30
5.1. Opis modela	30
5.2. Opis ispitivanja	33
5.3. Ravni poprečni prag - opis i obrada izlaznih rezultata	38
5.4. Lučni prag - opis i obrada izlaznih rezultata	45
5.5. Usporedba ravnog poprečnog i lučnog praga.....	53
6. Zaključak	57
7. Zahvale	59
8. Popis slika.....	60
9. Popis tablica	62
10. Popis literature	63
11. Sažetak	65
12. Summary	67

1. Uvod

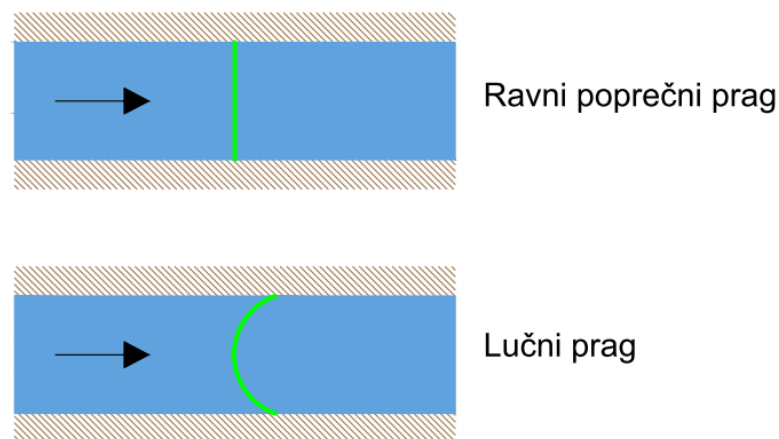
Promatrajući rijeku Savu na dionici kroz grad Zagreb i njene realne probleme degradacije korita, pojavila se ideja o analizi pozadine te pojave. Zbog navedene degradacije postojećih korita vodotoka, koja se ogleda u produbljivanju dna, pojavljuju se nepovoljni utjecaji na stanje vodnog režima površinskih i podzemnih voda te uvjete eventualnog zahvaćanja vode iz vodotoka i podzemnih voda kao i na sustav obrane od poplava. Ta globalna i lokalna nestabilnost korita postat će inspiracija za ovaj rad i to u tolikoj mjeri koliko je moguće u laboratorijskim uvjetima ispitati i utvrditi doprinos riječnih pragova kao mogućih rješenja ove problematike. Pritom će se određeni parametri idealizirati i pojednostaviti, što je čest slučaj u inženjerskoj praksi. Ovim radom, koji svoje uporište nalazi u rijeci Savi, nije cilj riješiti njene probleme – jer je to na ovoj razini neizvedivo, nego pokazati kako utjecaj geometrije utječe na poboljšanje postojećih uvjeta. Predmetom početne analize bio je i postojeći prag na lokaciji Termoelektrane-toplane Zagreb (TE-TO Zagreb) koji je zbog manjkavosti prilikom projektiranja i izvođenja doveo do produbljivanja korita nizvodno od nekoliko metara. Upravo zato će se prikazati usporedba dvaju potencijalnih rješenja pragova (ravnog poprečnog i lučnog), gdje će se pri jednakim uvjetima u oba slučaja, mjeriti broj odnešenih čestica, vrijeme i kritični protok.

Kroz rad će se sustavno - najprije mikroskopski, a zatim i makroskopski, analizirati djelovanja na čestice, ukazati na pojavu uklještenosti kod lučnog oblika i na povoljniji prijenos opterećenja sila, što će također biti detaljno objašnjeno u posebnom poglavlju 4. Mikroskopski pogled na uklještenost krune.

Osnovna misao vodilja je da će se lučni oblik po više kriterija dokazati kao povoljniji i skladniji izbor po pitanju uklještenosti i prijenosa opterećenja od ravnog oblika. Ta inicijalna premisa bit će podvrgnuta laboratorijskom ispitivanju u kontroliranim i unaprijed definiranim uvjetima. Dokazat će se opravdanost korištenja upravo takvog geometrijskog oblika ispred pravocrtnog u pogledu same čvrstoće i otpornosti materijala, odupiranja djelovanju većih opterećenja te utjecaja (ne)zavisnog međusobnog djelovanja čestica na susjedne.

2. Prag

Pragovi su poprečne regulacijske građevine čija je osnovna funkcija stabilizacija uzdužnog profila korita [1]. Izgradnjom praga smanjuje se protočni profil korita što izaziva uspor, remećenje strujne slike te ubrzano tečenje na kruni i na nizvodnom pokosu praga. Povećanjem brzina povećava se i snaga toka vode koji pokušava odnijeti čestice praga i to prvo one na kruni praga. Zbog te činjenice bitno je prag izgraditi od materijala koji je otporan na fluvijalnu eroziju ili ga oblikovati na način da se postigne bolja ukliještenost gradivnog granulata što će se ovim projektom pokušati i dokazati. Naime, u laboratoriju će se izvesti ispitivanje ravnog poprečnog praga i praga lučnog oblika. Oba oblika prikazana su na slici 1.



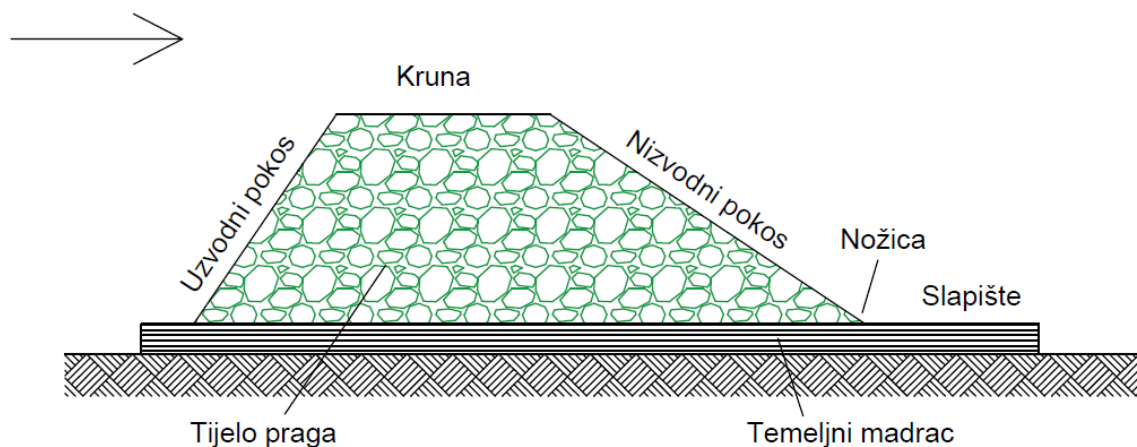
Slika 1. Tlocrtni, shematski prikaz ravnog poprečnog i lučnog praga

Prag je konstrukcija koja se najčešće gradi od betona ili kamena zalivenog u betonu. Međutim, prirodni materijali poput kamena ili šljunka su estetski prihvatljiviji i zadovoljavaju zahtjeve arhitekata. Poželjno je da pragovi od kamenog nabačaja što više nalikuju vodotoku u kojem se nalazi [3]. Veličina granulata trebala bi osigurati kvalitetnu ispunu međuprostora većih kamenih blokova kako bi se postigla što bolja kompaktnost tijela praga. Još jedan kriterij koji nam definira veličinu kamenog granulata je vučna sila koja pokreće čestice djelujući na njih tangencijalno [2]. Osim

estetske funkcije kameni nabačaj smanjuje energiju vode na način da se energija disipira među šupljinama kamena u tijelu praga.

Jedna od mana pragova od kamenog nabačaja je veličina kamenih blokova koji su vrlo teški i postoji opasnost da potonu u slabo nosivim, aluvijalnim tlima. Osim što su podložni slijeganju, veliki kameni blokovi svojom veličinom i težinom zahtijevaju skupu mehanizaciju prilikom ugradnje, naročito zbog specifičnih uvjeta izvođenja u vodi koja se kreće. Nadalje, pragovi kao građevine iziskuju velike količine materijala za njihovu izgradnju koju treba pribaviti i transportirati iz pozajmišta što uvelike utječe na troškove izgradnje. U praksi se pribjegava jeftinijim tehničkim rješenjima, pa se materijal nabavlja u blizini zahvata i zatim dodatnom obradom poboljšavaju njegova svojstva.

Osnovni konstruktivni elementi regulacijskih pragova su: tijelo praga, kruna, nožica, temeljni madrac, uzvodni i nizvodni pokos i slapište



Slika 2. Poprečni presjek praga s prikazanim konstruktivnim elementima

Rijeka sama formira i erodira svoje vlastito korito. Svaka promjena prirodnih osobina korita rezultira odgovorom prirode s težnjom ka prvobitnom stanju [1]. Izgradnjom praga prepriječio se protočni profil vodotoka, i to kamenim materijalom koji je puno čvršći od onog aluvijalnog od kojeg je korito izgrađeno. Stoga vodotoku ne preostaje drugo nego pokušati zaobići prag - produbljujući vlastite obale. Problem erozije obala rješava se usidrenjem korijena praga. Korijen praga je bočni dio praga koji se

produžuje, odnosno ukorjenjuje u obalno tlo s ciljem ojačanja veze praga i obala te izbjegavanja lokalne nestabilnosti.

Velika prednost lučnog za razliku od ravnog poprečnog praga je smanjenje problema erozije obala. Naime, lučni prag svojim oblikom preuzima sva opterećenja i unutarnjim tokom sila ih prenosi do korijena praga gdje se javlja rezultanta svih sila koju nazivamo potisak. Kod ravnog poprečnog praga nema uzdužne komponente unutarnjih sila zbog čega će usidrenja u obale morati biti puno čvršća i duža. Dodatna stabilizacija obala postiže se sadnjom biljaka snažnog korijenja te primjenom geotekstila koji sprječavaju eroziju.

Nadalje, smjer toka vode kod preljevanja preko ravnog poprečnog praga je okomit na njega što uzrokuje da voda teče tangencijalno uz samu obalu i ispire ju. Lučni prag također „navlači“ vodu da teče okomito na njega tako ju preusmjeravajući od obale prema središtu luka. Time se smanjuje energija toka blizu obale, no znatno se povećava energija u samom centru korita zbog čega je potrebno urediti slapište.

Slapište je prostor u kojeg se obrušava voda nakon što se prelije preko praga. Namjena slapišta je da „uništi“ svu kinetičku energiju i tako zaštititi nizvodni dio vodotoka od potkopavanja i erozije [4]. Dno slapišta mora biti sposobno prihvatiti jake udare vodnog mlaza. Velika prednost lučnog za razliku od ravnog poprečnog je da omogućava izgradnju kraćeg slapišta. Naime na nizvodnoj nožici ravnog poprečnog praga udar mlaza vode jednoliko je raspodijeljen po širini. Potrebna je velika duljina slapišta kako bi voda daljnim otjecanjem izgubila silnu energiju koja se akumulirala na ravnom pragu. S druge strane, u lučnom se pragu voda prilikom preljevanja koncentrira u središte luka, time se vodni mlazovi frontalno sudaraju i međusobno poništavaju vlastite energije. Prisutna je velika disipacija energije koncentrirana na jednom mjestu što zahtijeva čvršće i kvalitetnije slapište. S obzirom da je većina energije na tom mjestu već izgubljena, slapište može biti izvedeno kraće nego kod ravnog poprečnog praga. Time je smanjen utrošak materijala za njegovu izgradnju, a samim time dolazi i do smanjenja ukupnih troškova.

2.1. Režim tečenja preko praga

Tečenje u prirodnim vodotocima je nestacionarno, nejednoliko, turbulentno, trodimenzionalno i sa stalnim promjenama režima. Prirodno korito je neprizmatično, različite hrapavosti po duljini i geometrija mu je vremenski promjenjiva. Voda koja teče koritom je pomiješana s nanosom [1]. Opis ovakvog procesa je vrlo složen. Potrebno je u laboratorijskom ispitivanju uvesti određene pretpostavke radi pojednostavljenja proračuna.

Model u laboratoriju je kanal pravokutnog poprečnog presjeka širine 1 m, iz čega slijedi da je geometrija vremenski nepromjenjiva, korito prizmatično, tečenje jednoliko i hrapavost duž kanala konstantna. Različiti oblici praga će se uspoređivati u stacionarnim uvjetima, tj. pri konstantnom protoku.

Voda teče prema pragu sa slobodnim vodnim licem. Prag mijenja geometriju korita tako što mu se smanjuje protočni profil, zbog čega dolazi do suženja strujnih cijevi i povećanja brzina. Naposljetku se javlja povećano vrtloženje i lokalni gubici energije što uzrokuje promjenu režima tečenja. Režim tečenja se dijeli na mirni, siloviti i kritični. Definiramo ga pomoću specifične energije poprečnog presjeka. Specifična energija je mehanička energija jedinice mase tekućine koja protječe u jedinici vremena kroz promatrani presjek [5].

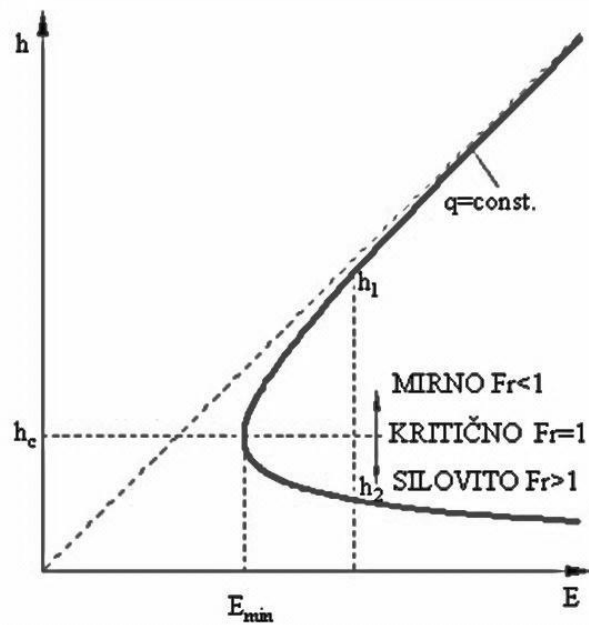
$$E = h + \frac{v^2}{2g} \quad (2.1)$$

gdje je:

h – dubina vode mjerena od dna [m]

v – brzina vode [m/s]

g – ubrzanje sile teže [m/s²]



Slika 3. Dijagram specifične energije poprečnog presjeka korita, ovisan o dubini, pri konstantnom specifičnom protoku [5]

Ekstrem (minimum) specifične energije poprečnog presjeka dobit će se ukoliko vrijedi jednakost:

$$\frac{v}{\sqrt{gh}} = 1 \quad (2.2)$$

gdje je: v – brzina vode [m/s]

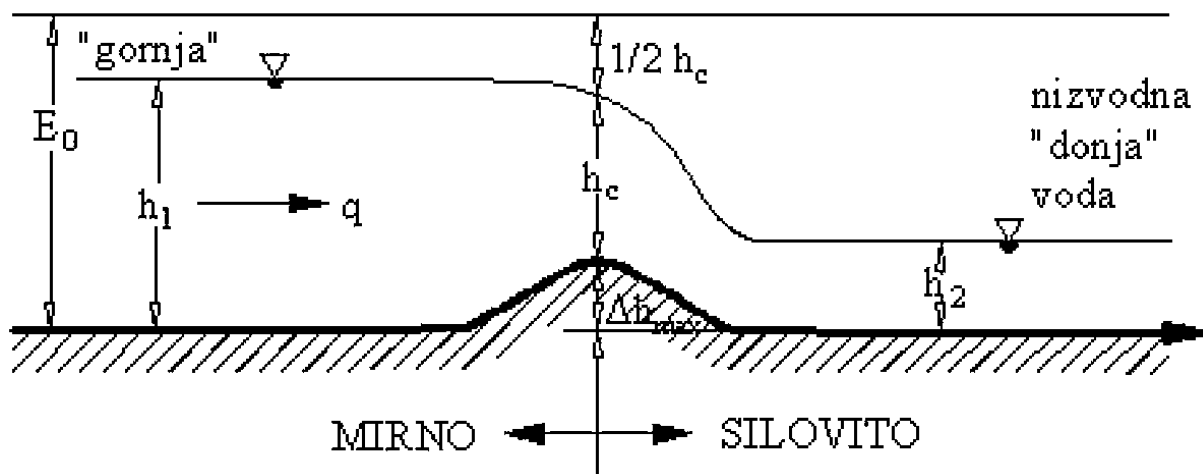
g – ubrzanje sile teže [m/s²]

h – dubina vode [m]

Izraz 2.2 predstavlja Froude-ov broj izjednačen s 1. Na slici 3. je prikazan funkcijski odnos dubine i specifične energije poprečnog presjeka pri konstantnom specifičnom protoku, a dobiva se pri varijaciji dna kanala. Može se uočiti da minimalna specifična energija definira kritično tečenje i ono će se ostvariti kada je odnos brzine i dubine takav da je Froude-ov broj jednak 1. Ako se pretpostavi da je za isti specifični protok dubina veća, intuitivno je jasno da će kinetička energija biti relativno mala i tada je

režim tečenja miran. U mirnom režimu tečenja će Froude-ov broj biti manji od 1 i u prirodi se to obično javlja u koritima s malim nagibima dna. Povećanjem nagiba pri istom specifičnom protoku dubina se smanjuje, a kinetička energija povećava tako da Froude-ov broj premaši vrijednost 1, režim tečenja prelazi u silovit režim.

Prethodna analiza upućuje na bitan zaključak da za bilo koju specifičnu energiju presjeka postoji odgovarajući maksimalni protok koji se može transportirati u uvjetima kritičnog tečenja. Iz tih razloga prirodni tokovi savladavaju prepreke (npr. prag) na „štedljiv“ način u kojem se uz najviše kote prepreka pojavljuju uvjeti kritičnog tečenja s kritičnim dubinama [5]. Na slici 4. prikazan je primjer preljevanja preko praga. Tečenje prije praga je mirno, a na pragu kritično.



Slika 4. Prikaz energetske linije i linije vodnog lica prilikom preljevanja preko praga [5]

3. Makroskopski pogled na prag

3.1. Općenito o luku

Luk se, povijesno gledano, prvi put pojavio u Mezopotamiji, a svoju prvu veću afirmaciju postiže za vrijeme Rimljana koji su ih sistematično gradili. Rimljani su gradeći lukove demonstrirali svu svoju raskoš i moć. Tada je taj geometrijski oblik bio ne samo graditeljski element, već i pokazatelj statusa i ugleda [6].

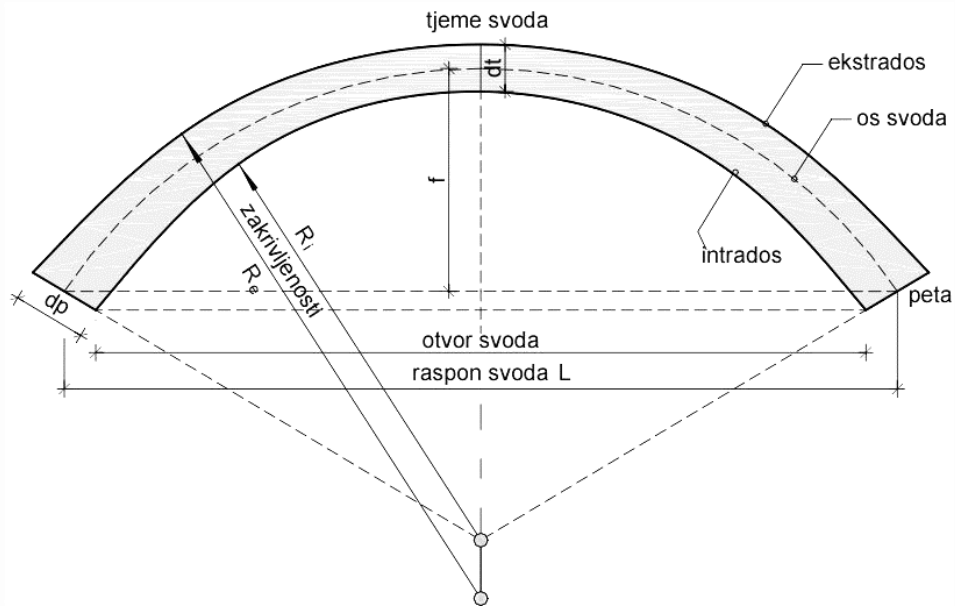
Već se tada prepoznalo da sama konstrukcija luka i njegovi parametri poput osi luka, intradosa, ekstradosa i spljoštenosti luka, uvelike utječu na samo izvođenje. Prepoznala se međusobna povezanost i isprepletenost mikroskopskog i makroskopskog pogleda te konstrukcije. Upravo je taj odnos posebno zanimljiv u radu gdje će se u sljedećim poglavljima pokazati da se primjenom međusobno uklještenih čestica povećava otpornost i stabilnost makroskopski gledano cijele konstrukcije, u konkretnom slučaju - riječnog praga.

Specifičnost luka jest smanjenje momenta savijanja ili njegovo potpuno iščezavanje. U slučaju da momenta savijanja nema, govori se o idealnom slučaju kojem treba težiti. Kod takvog se luka ravnoteža sila ostvaruje tlačnim potiscima prema osloncima luka. Takav oblik koji poprima element bez fleksijske krutosti pod zadanim opterećenjem naziva se funikularnim oblikom i vrijedi samo kada je luk u čistom tlaku [7]. Momenti savijanja se javljaju tek kad se spojnicu rezultanti unutarnjih sila u svakom presjeku (tlačna linija) ne podudara s osi luka. Luk, općenito, u svojim osloncima predaje znatne horizontalne potiske što zahtijeva dobru nosivost tla.

Prema statičkom sustavu, lukovi se dijele na trozglobne, dvozglobne i upete lukove. Trozglobni lukovi su statički određeni i imaju tri zgloba koji se nalaze u petama luka i u tjemenu luka. Dvozglobni i upeti lukovi spadaju u statički neodređene sustave. Dok upeti lukovi, kao najjednostavniji i najčešće korišteni, nemaju zglobove, zglobovi kod dvozglobnog luka se nalaze na petama luka [8].

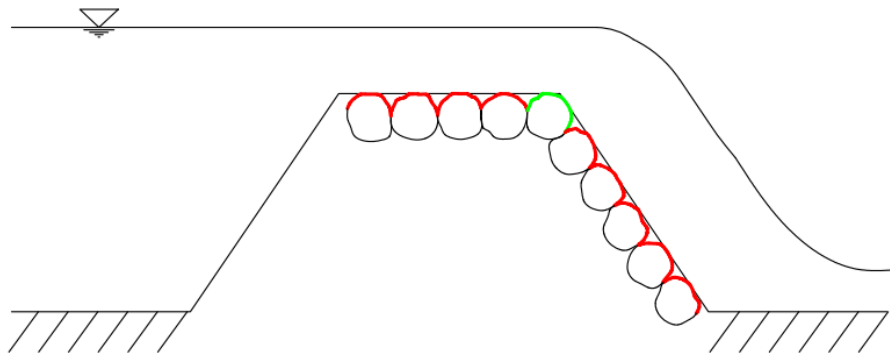
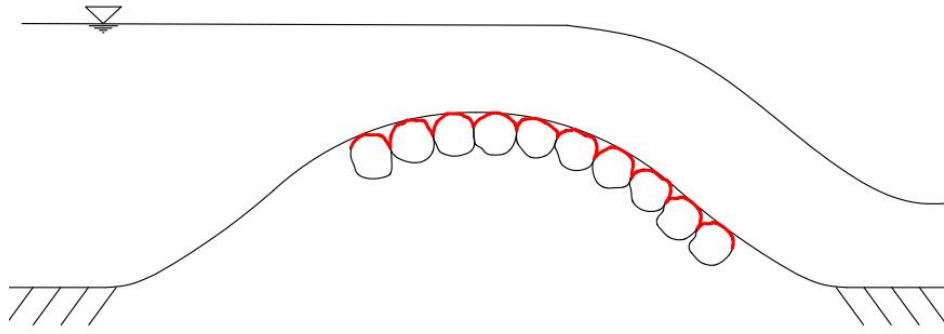
Najviša točka luka naziva se tjemenu luka, dok su najniže točke one koje dodiruju oslonce i nazivaju se petama luka. Intrados je unutarnja linija luka, dok je ekstrados

vanjska linija luka. Vertikalna udaljenost između pete i tjemena luka naziva se strelicom luka i označava se slovom f . Raspon luka, u oznaci – L , je horizontalna udaljenost točaka osne linije u petama luka. Upravo je omjer strelice i raspona luka (f/L) jedan od najrelevantnijih parametara kod projektiranja, a naziva se spljoštenost ili plitkost luka [9]. Navedeni parametri luka prikazani su na slici 5.



Slika 5. Osnovni dijelovi luka [9]

Ako poprečni presjek praga oblikujemo na dva načina - trapezni poprečni presjek i lučni poprečni presjek (slično preljevu praktičnog profila), ponovno se može pokazati kako je lučni oblik povoljniji. Hidrodinamička sila djeluje na neko tijelo ovisno o površini koja je izložena djelovanju vode. Promatra se prvi najgornji red čestica izloženih hidrodinamičkom djelovanju vode. U pragu trapeznog poprečnog presjeka čestice su poslagane na način da sve imaju podjednako izloženu površinu na koju voda izravno djeluje, osim one čestice koja je u samom uglu (označena zelenom bojom na slici 6). Kod praga zakrivljenog poprečnog presjeka sve su čestice izložene hidrodinamičkom djelovanju jednakom površinom. U trapeznom poprečnom presjeku zelena čestica je slaba karika, ona je najizloženija i najveća je vjerojatnost da će prva biti odnešena tokom vode. Zaključak je da je lučni oblik povoljniji ne samo u tlocrtnom oblikovanju nego i ako ga koristimo u oblikovanju poprečnog presjeka.

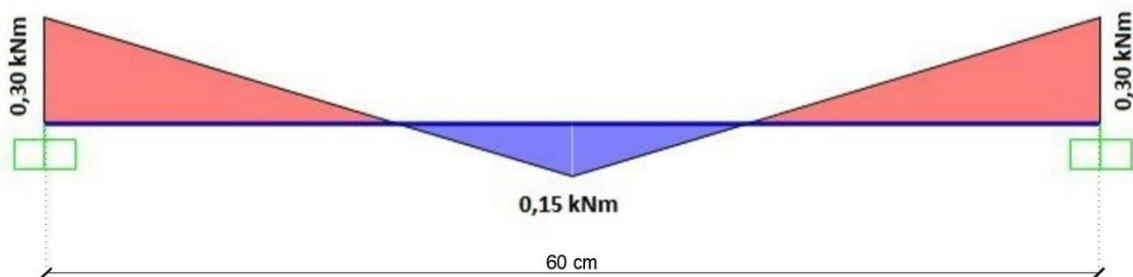


Slika 6. Usporedba geometrije u poprečnom presjeku

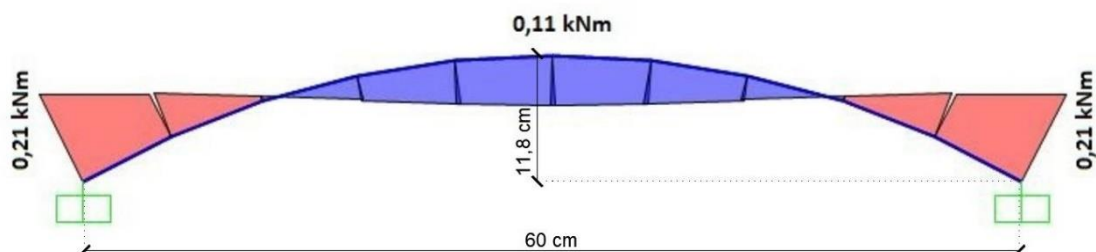
3.2. Luk kao monolitni prag

Luk je neovisno o materijalu zasigurno bolji konstruktivni element od ravnog oblika. U ovom se radu promatra luk od kamenog nabačaja i utjecaj geometrije na stabilnost i otpornost konstrukcije. Međutim, ukoliko se kameni nabačaj zamijeni armiranim betonom i tada će luk kao monolitna konstrukcija dati bolje rezultate nego što bi dala konstrukcija koja je potpuno ravna. Stavljen je naglasak na prijenos unutarnjih sila do oslonaca što je kod luka povoljnije. Ta će se teza potkrijepiti jednostavnom statičkom analizom opterećenja na luk i na ravnu gredu u programskom paketu *SAP2000*, ali i opisom samog prijenosa opterećenja kroz kamene blokove koji formiraju luk.

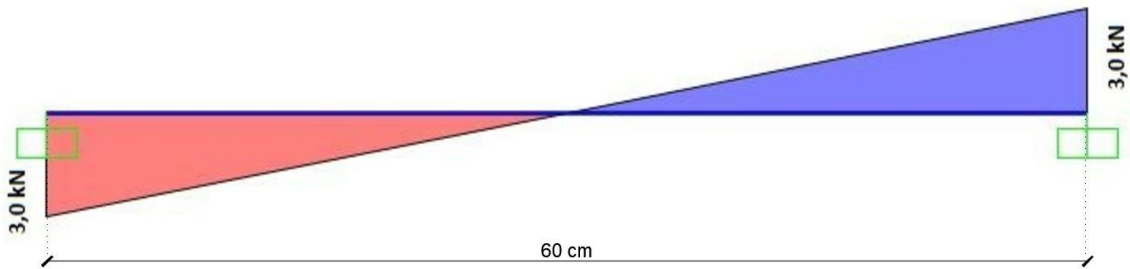
U software-u su ispitana greda i luk jednakih dimenzija od jednakog materijala s istim kontinuiranim opterećenjem (10 kN/m^2). Rezultati prikazuju smanjenje momenta savijanja i poprečnih sila kod lučnog oblika upravo zbog geometrijske komponente. Na sljedećim slikama prikazani su rezultati opterećenja ravne grede i luka.



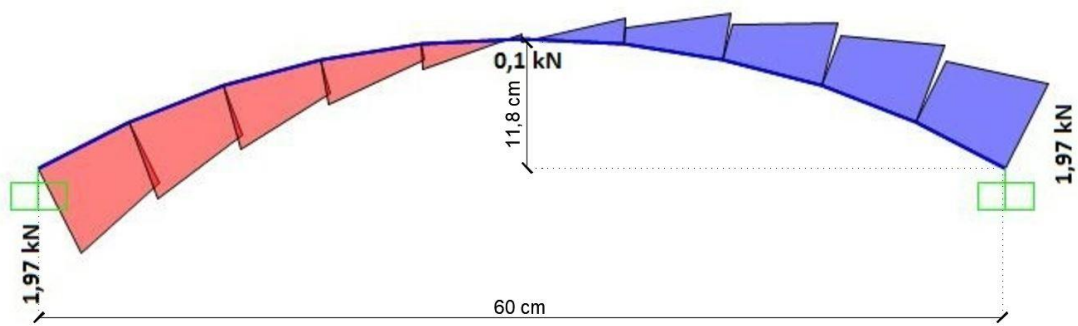
Slika 7. Momentni dijagram grede



Slika 8. Momentni dijagram luka



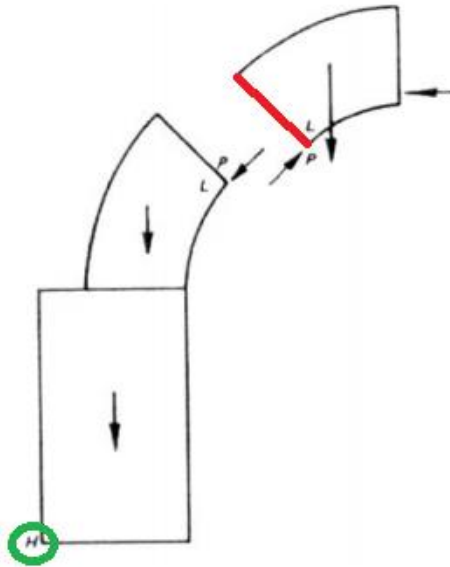
Slika 9. Dijagram poprečnih sila grede



Slika 10 Dijagram poprečnih sila luka

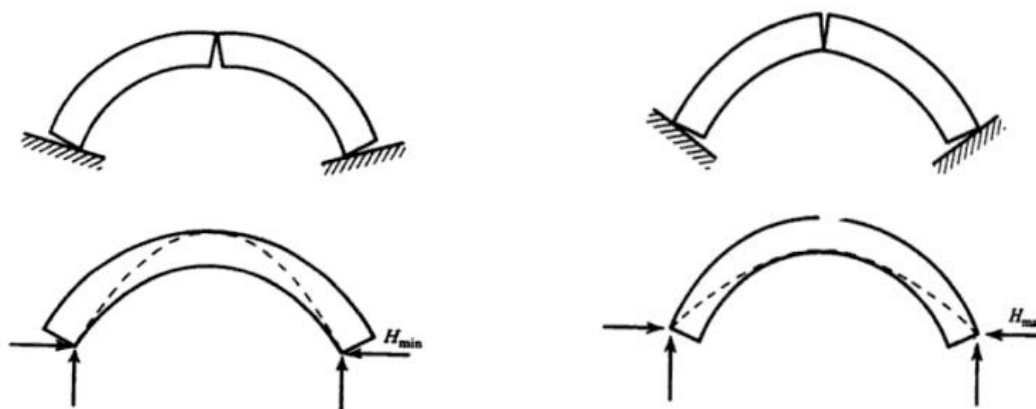
Robert Hooke - britanski fizičar, matematičar i izumitelj, uveo je sljedeću pretpostavku: „Onako kako visi savitljiva nit (lančanica), tako će, ali obrnuto, stajati kruti luk“. Takav oblik se ranije spomenuo i naziva se funikularnim oblikom. Hooke-ov princip temelji se na određivanju matematičke funkcije lančanice i umetanju te lančanice između gornje i donje konture luka. Na taj se način određuje savršeni oblik luka kao i debljina stijenke koja je potrebna da se odupre određenom opterećenju koje djeluje na nju. Philippe de La Hire je proučavanjem došao do spoznaje da trenje daje potrebnu stabilnost luku te da se ne smije zanemariti. Zbog trenja tlačna linija više nije morala biti okomita na dodirne površine [10]. Njegova cijela filozofija može se objasniti uz pomoć slike 11. Crvenom bojom označena linija predstavlja dodirnu plohu dvaju susjedna bloka koji nisu povezani nikakvim vezivnim sredstvom. Kada luk opteretimo dolazi do pojave zgloba u točki L . Ona tada postaje poveznicom između gornjeg i donjeg bloka kojom će se prenositi sve sile iz gornjeg bloka u donji blok te konačno u stupove luka. Nakon

što se zasebno proračunaju težine svih blokova, mogu se dobiti sile koje djeluju na cijeli luk (točka L , označena na slici 11). Za provjeru stabilnosti konstrukcije se provjerava moment oko točke H (zelenom bojom označena na slici 11.)



Slika 11. Statika polukružnog luka [10]

Prilikom jednolikog opterećivanja lučnog oblika, za razliku od ravne grede, dolazi do pojave uzdužnih sila unutar konstrukcije. Kod luka se to manifestira u pojavi horizontalnog potiska koje se odupire opterećenju lukova i ne dopušta deformaciju, odnosno širenje luka. Također, uz prethodno napisanu činjenicu, Charles – Augustin de Coulomb, ustvrdio je da pojava zglobova u luku ne znači nužno gubitak stabilnosti, već je bitna egzistencija sile H u petama lukova koja će držati luk stabilnim. U slučaju da se nanese opterećenje na luk koje je veće od dopuštenog, dolazi do stvaranja zlobova koji vode do mehanizma rušenja luka. No, prije toga, zbog direktnog utjecaja opterećenja, dolazi do širenja oslonaca, povećavanja raspona i oslobađanja zglobova u tjemenu ekstradosa luka i na intradosu u petama. Stabilnost takvog luka moguća je isključivo uz prisutnost minimalne sile H_{min} . Iz slike 12. vidljivo je da analogija postoji. Tada će uz smanjenje raspona doći do oslobađanja triju zglobova na istim mjestima, samo što će se naći na suprotnim stranama luka što će inicirati djelovanje maksimalne sile H_{max} . Do pojave mehanizma, a samim time i rušenja luka, doći će ukoliko sile horizontalnih potisaka ne budu između H_{min} i H_{max} .



Slika 12. Zglobovi i tlačna linija u ekstremnim slučajevima [10]

Bitno je ostvariti da se opterećenje prenosi s bloka na blok unutar samog volumena luka. To znači da tlačna sila, koja je rezultanta tlačnih naprezanja na pojedine dodirne plohe blokova, mora prolaziti tim plohami. Točka kojom sila prolazi kroz blok naziva se centar potiska. Stabilnost i ravnotežu održavaju dva potiska sa svake strane bloka. Takav fluidan tok sila mora se osigurati od tjemena luka pa sve do pete gdje luk prenosi cjelokupno opterećenje na oslonce. Na kontaktu pete luka i oslonca javlja se najveća sila u luku, a ona je rezultanta svih prethodnih sila. Ta se sila prenosi s luka na oslonac i zove se potiskom luka. Dakle, tlačna linija predstavlja resultantnu krivulju hvatišta tlačne sile u presjecima luka. Njome je određen položaj, odnosno ekscentricitet djelovanja tlačne sile u svakom presjeku luka za neko promatrano opterećenje te se pomoću nje može odrediti veličina momenata savijanja u svim presjecima luka [10].

Sila koja također zbog utjecaja geometrije djeluje u smanjenom intenzitetu i time manje opterećuje konstrukciju je sila otpora oblika (izraz 3.1). Tijelo koje se nađe u struji fluida izloženo je djelovanju sila koje su posljedica neravnomjernog rasporeda tlakova kao i posmičnih naprezanja nastalih uslijed viskoznosti fluida i hrapavosti tijela [11]. S obzirom da se u ovom, konkretnom slučaju govori o pragu kao hidrotehničkoj građevini u struji vode (fluida), ovdje se uzimaju u obzir hidrodinamičke sile. Sila otpora oblika jednaka je:

$$F_D = C_D \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (3.1)$$

pri čemu je:

F_D – sila otpora oblika [N]

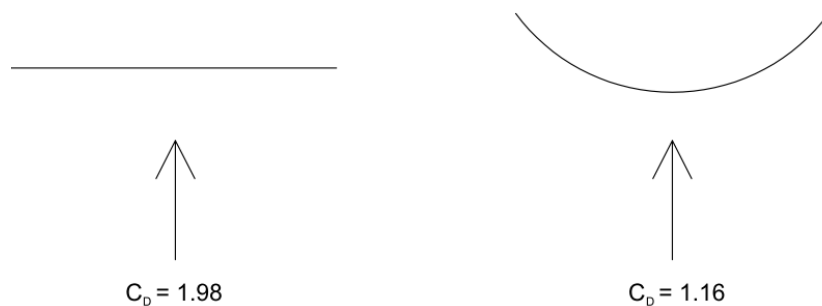
C_D – koeficijent otpora [1]

ρ – specifična gustoća fluida [kg/m³]

A – površina tijela [m²]

v – konstantna brzina fluida [m/s]

Koeficijent otpora za ravni i lučni oblik dan je na slici 13.



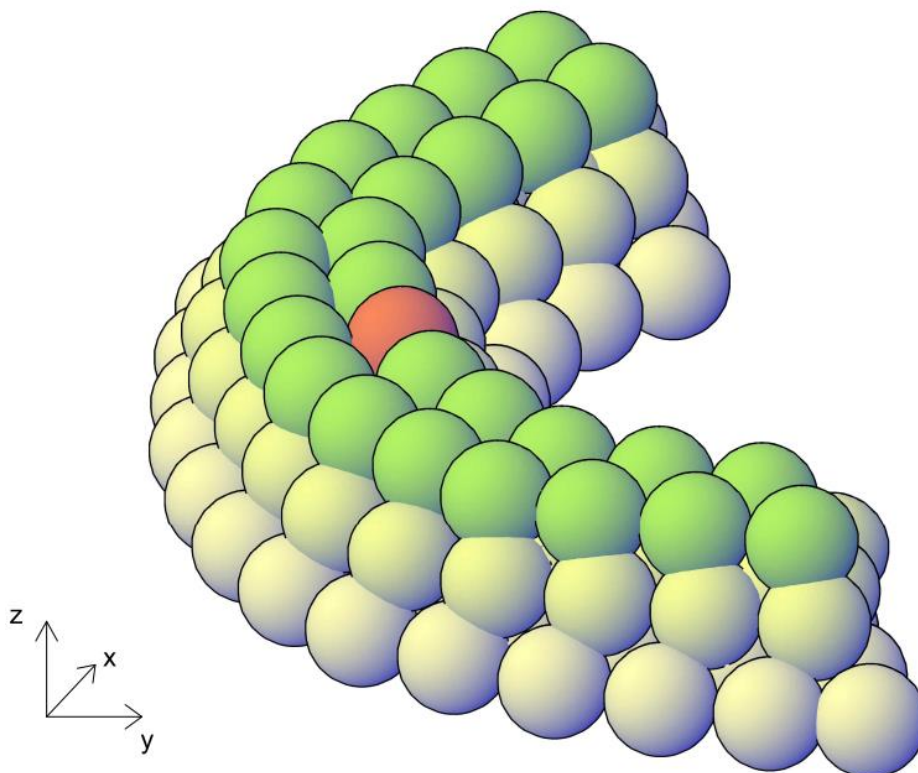
Slika 13. Vrijednosti koeficijenta otpora C_D za različite oblike

Ovdje se luk promatra kao monolitna konstrukcija tako da je destabilizirajuća sila manja zbog koeficijenta otpora oblika. Samim time se smanjuje pritisak i opterećenje konstrukcije. Prethodno se pokazalo (slika 6.) da bi gledajući svaku česticu zasebno, sila otpora oblika u lučnom pragu bila manja jer je i površina čestice izložena hidrodinamičkom djelovanju manja. Neovisno o izboru materijala kao i načinu izvedbe same konstrukcije – bila ona monolitna ili sastavljena od kamenih blokova, može se konstatirati kako je lučni oblik pogodniji naspram ravnog zbog navedenih prijenosa opterećenja kroz tlačnu liniju, ali i zbog nemalog smanjenja sile otpora oblika.

4. Mikroskopski pogled na uklještenost krune

Usporedbom lučnog i ravnog poprečnog praga želi se pokazati da će lučni oblik biti povoljniji s aspekta čvrstoće i stabilnosti. Jedini promjenjiv parametar je geometrija dok su svi ostali uvjeti ispitivanja jednaki za oba slučaja, što će detaljnije biti objašnjeno u poglavlju 5. Fizikalni model. Pojednostavljeno gledano želi se potvrditi hipoteza da će prva, najizloženija čestica praga, biti odnešena tokom vode u ravnom poprečnom pragu prije nego u lučnom pragu.

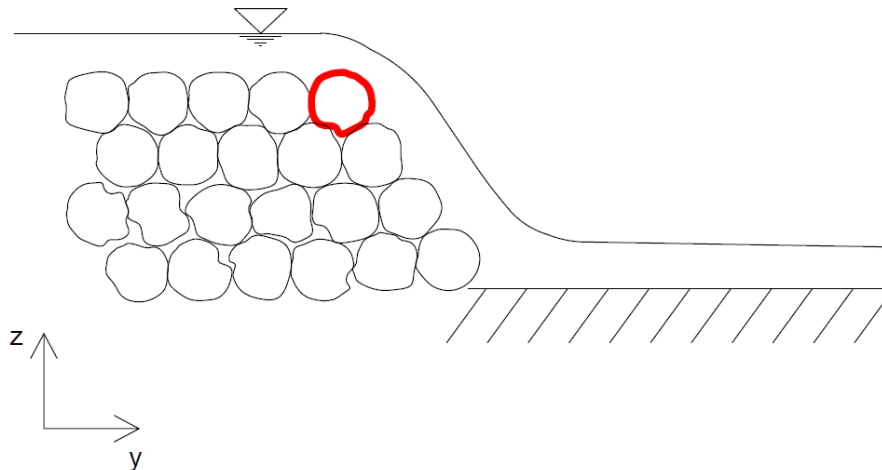
Na slici 14. će radi bolje vizualizacije i shvaćanja svih daljnjih presjeka biti prikazan trodimenzionalni model praga. Čestica koja je obojena crveno je najizloženija čestica i u nastavku će se analizirati opterećenja na nju.



Slika 14. Trodimenzionalni prikaz praga

4.1. Uklještenje u tlocrtnom pogledu

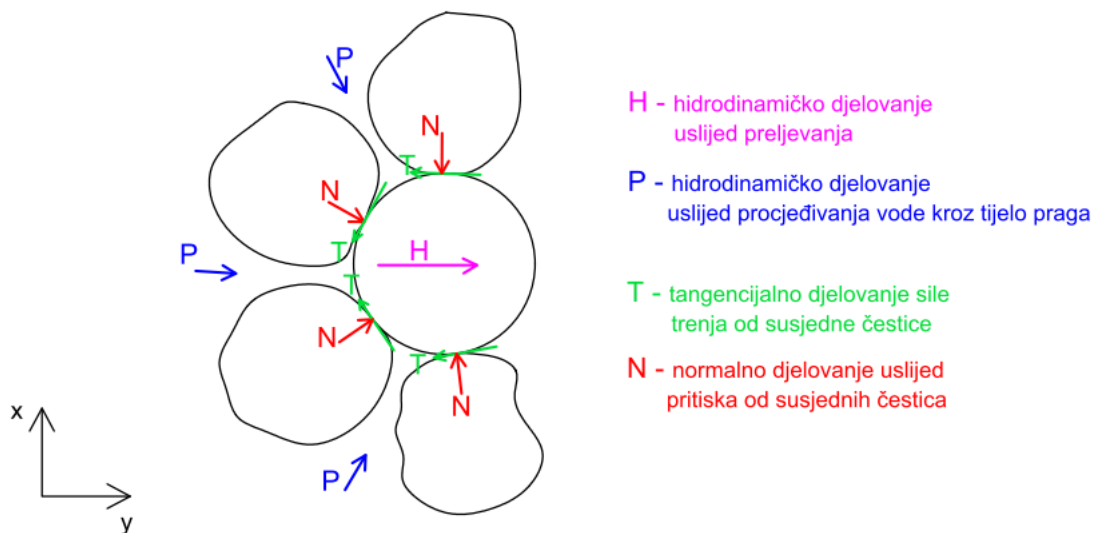
U nastavku će se promatrati samo prvi - najgornji red (na slici 15. obojen crveno) na koji najintenzivnije djeluje vanjsko opterećenje. Radi idealizacije i jednostavnosti objašnjenja, promatraju se samo vanjska opterećenja koja leže u xy -ravnini.



Slika 15. Prikaz rasporeda čestica u poprečnom presjeku praga

Djelovanja u tlocrtu

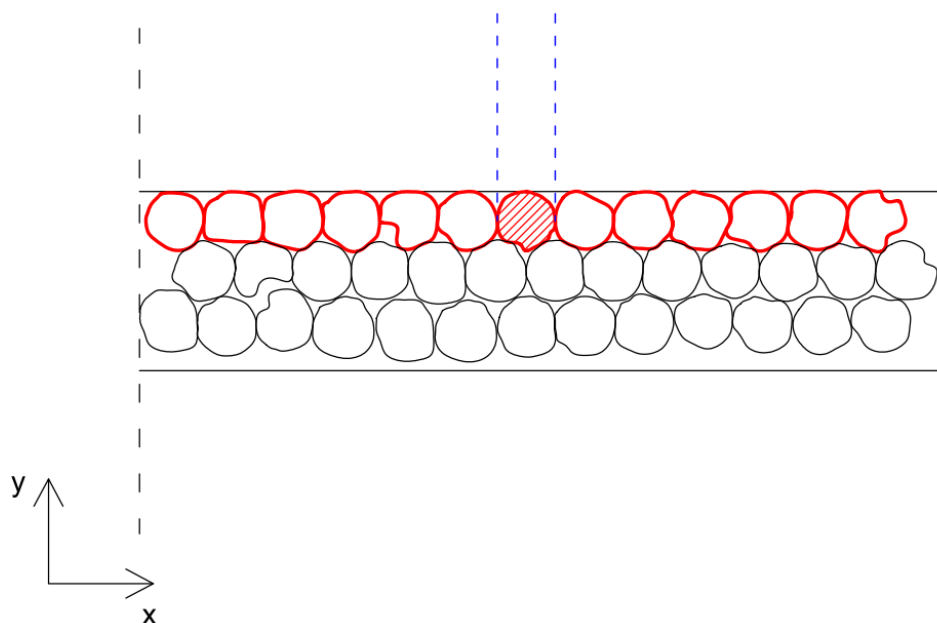
Na slici 16. navedene su sve sile koje djeluju u xy -ravnini. Destabilizirajuće sile su one koje doprinose da promatrana čestica bude odnešena tokom vode. To su: hidrodinamičko djelovanje uslijed preljevanja (H), hidrodinamičko djelovanje uslijed procjeđivanja vode kroz tijelo praga (P) i normalno djelovanje uslijed pritiska od susjednih čestica (N). Jedina stabilizirajuća sila koja djeluje u xy -ravnini je sila trenja na kontaktu dviju susjednih čestica.



Slika 16. Prikaz svih sila koje djeluju u xy -ravnini

Usporedba tlocrtne ukliještenosti kod oba oblika

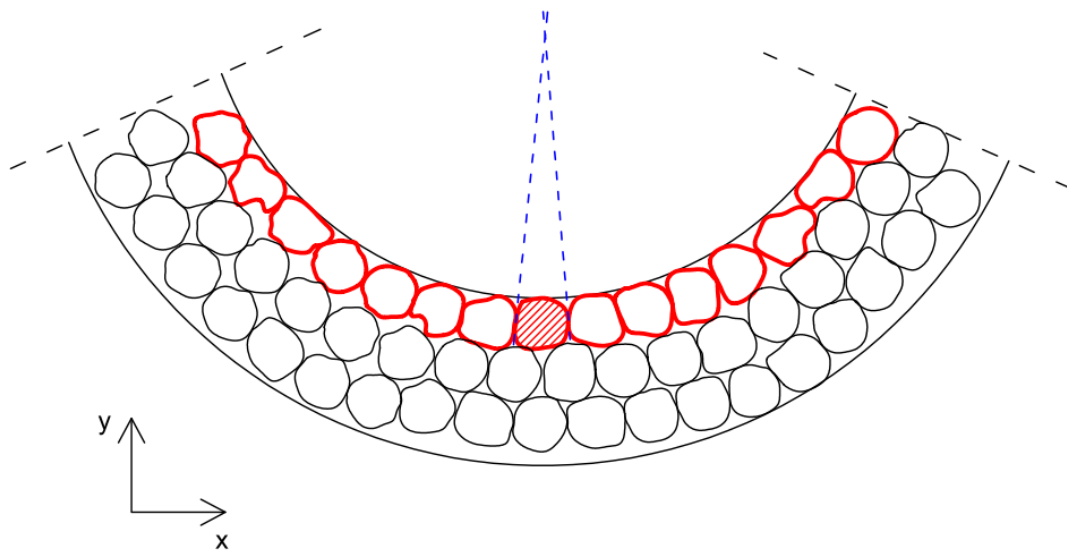
U ravnom poprečnom pragu su čestice posložene u redu jedna pokraj druge. Promatrat će se samo jedna čestica koju vanjsko djelovanje „pokušava izgurati iz reda“ (na slici 17. ta je čestica šrafirana)



Slika 17. Prikaz krune ravnog poprečnog praga gledajući odozgo

Sila trenja, koja se protivi klizanju jedne čestice uz drugu uz međusobno pritiskanje je jedina stabilizirajuća sila. Trenje djeluje u dodirnim točkama dviju susjednih čestica, a ovisi o hrapavosti materijala od kojeg su čestice izgrađene. Kada se povuku pravci u smjeru djelovanja sile trenja, dobiju se dvije paralelne tangente. One su udaljene za jedan promjer promatrane čestice.

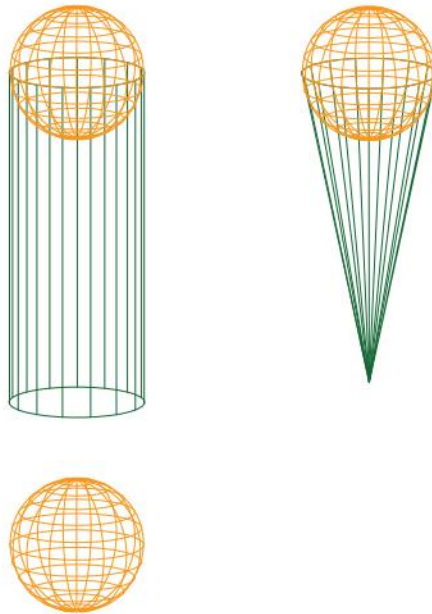
U lučnom pragu, prvi red čestica poslagan je na način kao što je prikazano na slici 18. promatra se šrafirana čestica.



Slika 18. Prikaz krune lučnog praga gledajući odozgo

U kontaktnim točkama sa susjednim česticama povuku se tangente u smjeru djelovanja sile trenja i kao što je vidljivo na slici 18., u slučaju lučnog praga tangente se sijeku. Ova činjenica onemogućava čestici slobodan hod između dvije susjedne čestice i stvara ukliještenost.

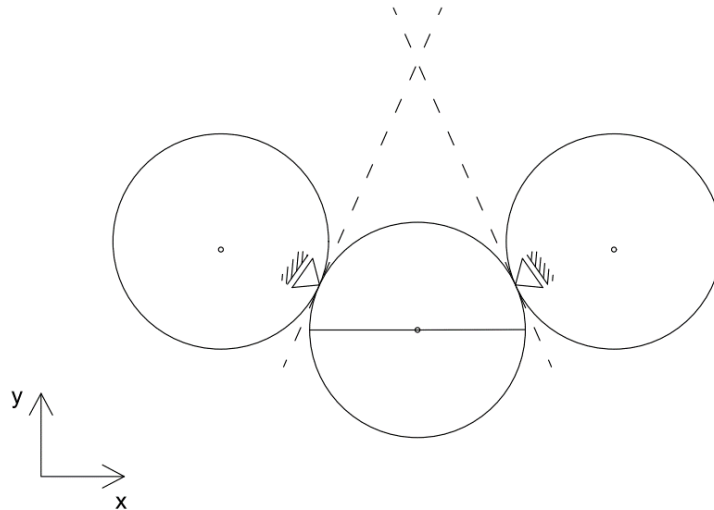
Ukliještenost se slikovito može pokazati na primjeru kuglica sladoleda u kornetu. Kada se kuglica ubaci u kornet, ona neće pasti do samog dna, nego se uglavi u kornet do one dubine na kojoj je udaljenost stranica korneta jednaka promjeru kuglice sladoleda. Kada kornet ne bi bio oblika stošca nego šuplji valjak (paralelnih stranica) tada bi kuglica sladoleda imala omogućenu traku slobodnog hoda i skliznula niz kornet. (slika 19.)



Slika 19. Prikaz uklještenosti čestica pomoću kuglice sladoleda u kornetu

Zaključuje se da je u ravnom poprečnom pragu jedina stabilizirajuća sila koja ne dozvoljava da promatrana čestica ispadne iz reda - sila trenja. Kad bi čestice bile idealno glatke kugle, promatrana čestica bi samo iskliznula iz reda. U lučnom pragu, osim sile trenja, u kontaktnim točkama postoji i normalna komponenta sile. Ona je okomita na silu trenja i nastaje zbog oslanjanja promatrane čestice na njima susjedne.

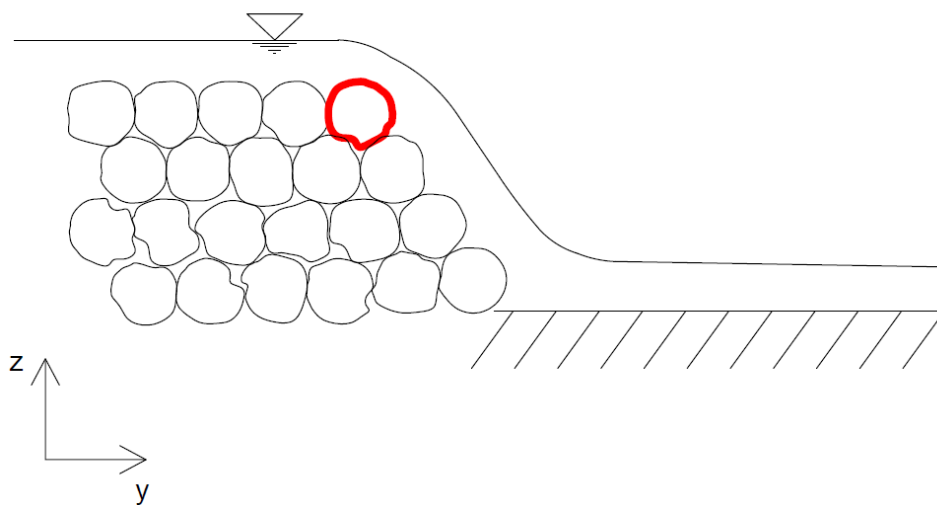
Lučnim načinom slaganja dobiva se to da se kontaktne točke između susjednih čestica nalaze tlocrtno iznad promjera promatrane čestice i time one postaju ležajevi na koje se promatrana čestica oslanja. Upravo je to uvjet koji treba ispuniti slaganjem kako bi se dobila bolja uklještenost, što je prikazano na slici 20. Nadalje, što je kut između tangenti povučениh u dodirnim točkama veći, to je uklještenje čestica veće.



Slika 20. Prikaz normalne komponente sile koja ima ulogu oslonca

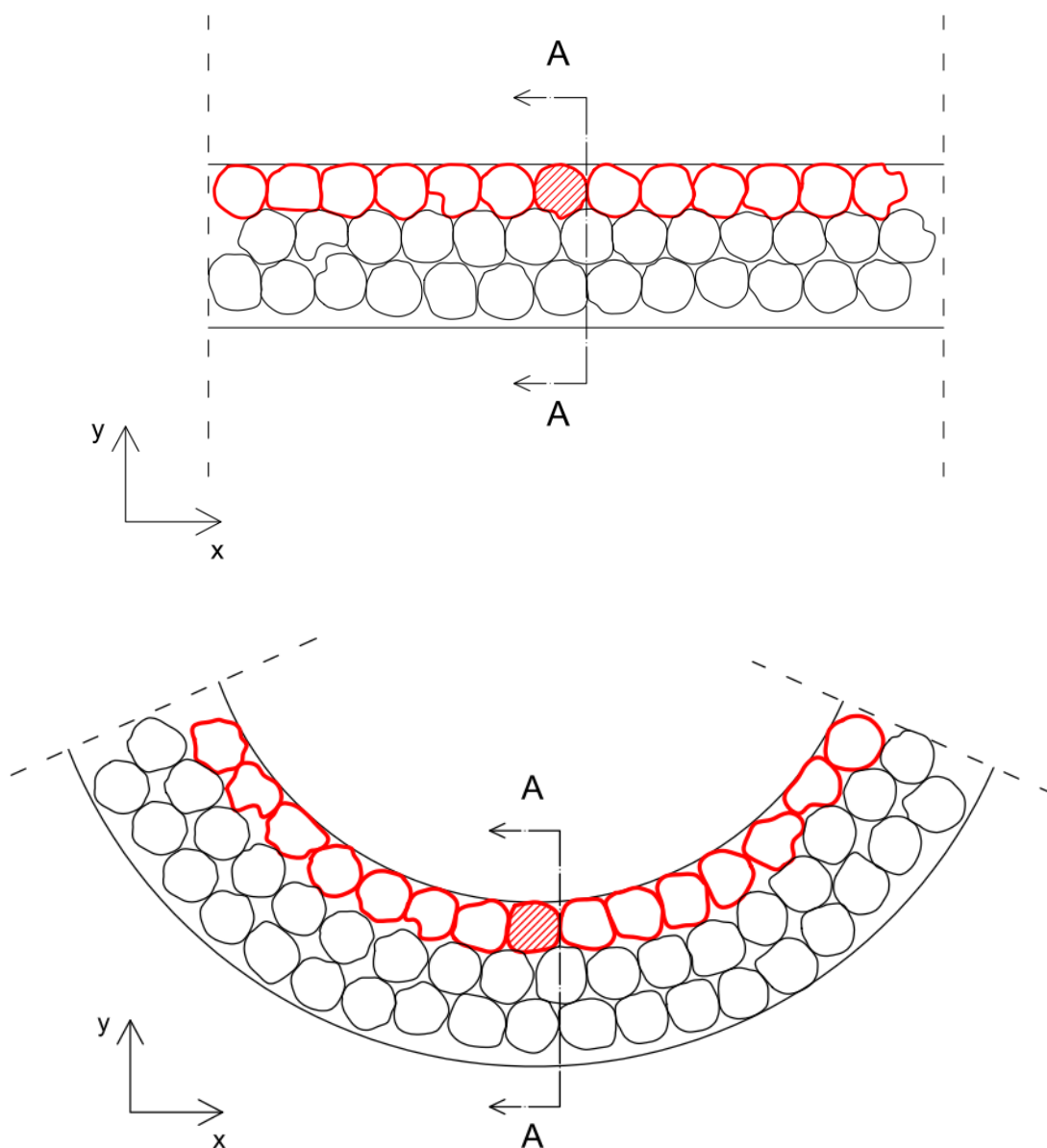
4.2. Ukještenje u poprečnom presjeku

Na kruni praga se javlja kritično tečenje i brzina se povećava prema kritičnoj brzini. Prva čestica na kruni praga je najkritičnija jer je površinom najizložena hidrodinamičkom djelovanju. (slika 21.)



Slika 21. Prikaz najkritičnije čestice u poprečnom presjeku praga

Zbog povećanja brzine i hidrodinamička sila je na tom mjestu najveća. Tločno gledano promatrat će se presjek A-A označen na slici 22.

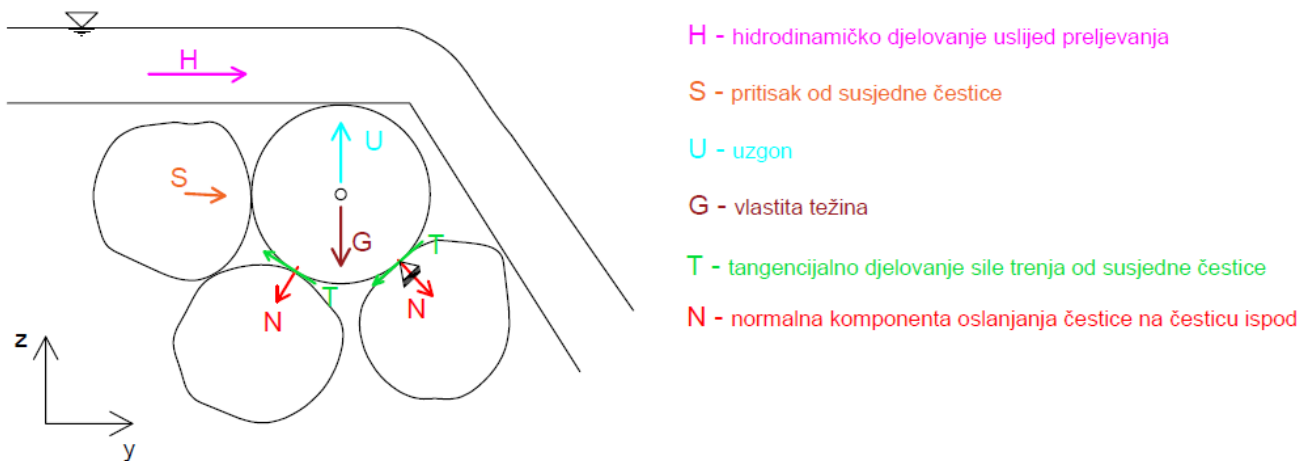


Slika 22. Tločno prikaz najkritičnijeg presjeka

U nastavku će se analizirati dominantna opterećenja koja djeluju u yz-ravnini i to samo prva čestica na kruni praga jer na nju najintenzivnije djeluju vanjska opterećenja.

Djelovanja u poprečnom presjeku

Na slici 23. navedene su sve sile koje djeluju u yz-ravnini. Destabilizirajuće sile su: hidrodinamička sila vode uslijed preljevanja (H), sila pritiska od susjedne čestice (S) i uzgon (U). Stabilizirajuće sile su: sila pritiska promatrane čestice kojom se oslanja na čestice ispod sebe (N) i vlastita težina (G)

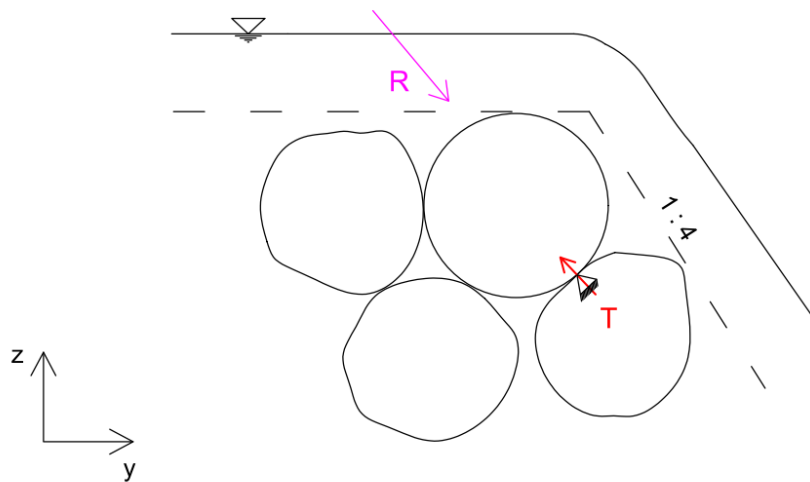


Slika 23. Prikaz svih sila koje djeluju u yz-ravnini

Uklještenost čestice u poprečnom presjeku

Hidrodinamička sila djeluje na promatranu česticu posredno i neposredno. Neposredno djeluje na površinu promatrane čestice, a posredno tako što pritišće susjednu česticu koja se onda oslanja u smjeru toka na promatranu i tako je pokušava izgurati iz reda. Destabilizirajućim djelovanjima se suprotstavlja vlastita težina čestice (stoga je povoljnije da čestice budu što veće i teže). S obzirom da je prag konstrukcija koja je uvijek pod vodom onda se javlja nepovoljno djelovanje uzgona. Uzgon smanjuje vlastitu težinu čestice, prema Arhimedovom zakonu, za onoliko koliko teži istisnuta tekućina. Na kontaktu promatrane čestice i one prve ispod nje javljaju se posmična komponenta (sila trenja) i normalna komponenta (sila oslanjanja čestice na česticu ispod sebe). Trenje se ne može svrstati u dominantne sile u ovom slučaju, jer je hidrodinamička sila vode puno veća pa se zanemaruje.

Kad se superponiraju sve dominantne sile koje djeluju na promatranu česticu dobit će se rezultanta R kojoj se suprotstavlja normalna komponenta sile u dodirnim točkama sa susjednim česticama (slika 24). S aspekta stabilnosti je bitno da nagib nizvodnog pokosa praga bude što blaži. Tada će normalna komponenta oslanjanja na susjednu česticu biti pod kutem koji je sličniji smjeru djelovanja rezultante i tako će se čestica moći suprotstaviti vanjskim djelovanjima. U praksi se on kreće od 1:3 do 1:4, a zbog ribljih staništa se zahtijeva i do 1:20.



Slika 24. Prikaz oslanjanja promatrane čestice na česticu ispod suprotstavljajući se rezultanti svih nepovoljnih djelovanja

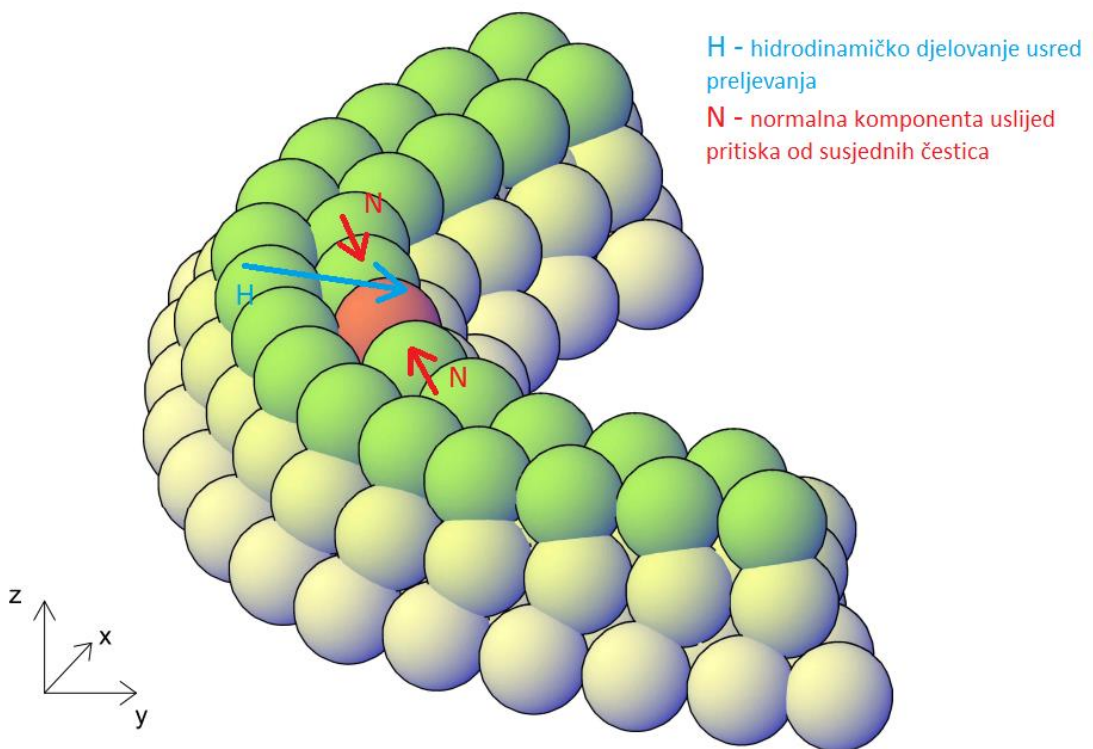
Nakon što se lučni i ravni poprečni prag presjeku yz-ravninom i usporede sve sile koje djeluju u toj ravnini, vidljivo je da će one biti jednake kod oba oblika. Zaključak je da se bolja uklještenost čestica različitim oblikovanjem praga očituje samo na silama koje djeluju u xy-ravnini.

4.3. Ukļeštenje u trodimenzionalnom pogledu

Sve dosad navedene sile djeluju na promatranu česticu istovremeno, u cijelom prostoru. U prethodnim su poglavljima sile bile zasebno razrađene u tlocrtu i u poprečnom presjeku samo kako bi se jednostavnije opisali. Sada će se superponirati dominantne sile i prikazati u trodimenzionalnom pogledu.

Stabilizirajuće sile su vlastita težina čestice, normalna komponenta oslanjanja čestice na česticu ispod (yz-ravnina) te na čestice lijevo i desno (xy-ravnina),

Destabilizirajuća djelovanja su uzgon na česticu, hidrodinamičko djelovanje uslijed prelijevanja, procjeđivanje i pritisak od čestice iza (xy-ravnina).



Slika 25. Trodimenzionalni prikaz lučnog praga s dominantnim djelovanjima

Pretpostavke

U prethodno navedenom tekstu promatrao se idealiziran slučaj djelovanja sila i uklještenja čestica te su zbog toga uvedene neke pretpostavke. Prvom pretpostavkom zanemaren je utjecaj sile trenja te su promatrane čestice idealizirane do oblika kugle. U stvarnosti su čestice nepravilne pa se postiže bolja uklještenost, a samim time se ostaje na strani sigurnosti. Destabilizirajuća djelovanja koja su zanemarena su: slijeganje tla, procjeđivanje vode kroz tijelo praga, vibracije u tijelu praga nastale zbog odvajanja Karmanovih vrtloga, erozija bokova korita uslijed koje usidrenja praga u tlu postaju nestabilna itd. Najvjerojatnije će neka od ovih sila biti ključna za rušenje praga i zbog toga će se u nastavku teksta detaljnije obraditi.

4.4. Mehanizam rušenja

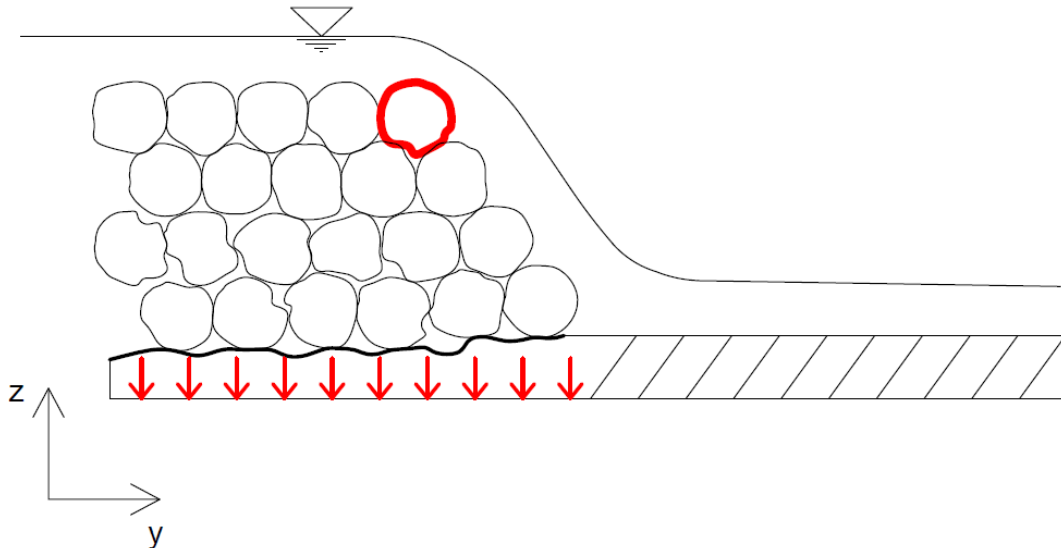
Kada prva čestica bude odnešena snagom toka vode, na njenom mjestu ostane šupljina. Zbog te je šupljine povećana površina kroz koju se voda procjeđuje i protok tada postaje jači. Sitnije čestice koje mogu proći kroz tu šupljinu se ispiru i tako dolazi do postepenog odnošenja materijala tzv. tunneling efekt [12]. U praksi se za sprječavanje odnošenja sitnijih čestica između zrna preporuča uporaba geotekstila.

Do mehanizma urušavanja praga dolazi postepeno zbog pomicanja čestica. Uslijed djelovanja dominantnih hidrodinamičkih djelovanja, čestice će se najprije pomaknuti na kritičnim mjestima na pragu - u sredini krune. Hidrodinamička sila nije jedino djelovanje koje će uzrokovati pomicanje čestica. Postoji još nekoliko pojava koje će potaknuti mehanizam rušenja i one će biti objašnjene u nastavku.

Slijeganje tla kao uzrok mehanizmu rušenja

Konstrukcija praga od kamenog nabačaja svojom vlastitom težinom pritišće tlo i uzrokuje njegovo slijeganje. Kameni blokovi od kojih se gradi prag su teški i ako tlo nije dovoljno nosivo postoji mogućnost njihovog propadanja i snižavanja kote krune. Osim vlastite težine prag preuzima i ostala opterećenja koja djeluju na njega te ih prenosi u

temeljno tlo. Tlo je zbog navedenog opterećenja podložno slijeganju što za sobom povlači i slijeganje samog tijela praga kao što je prikazano na slici 26.

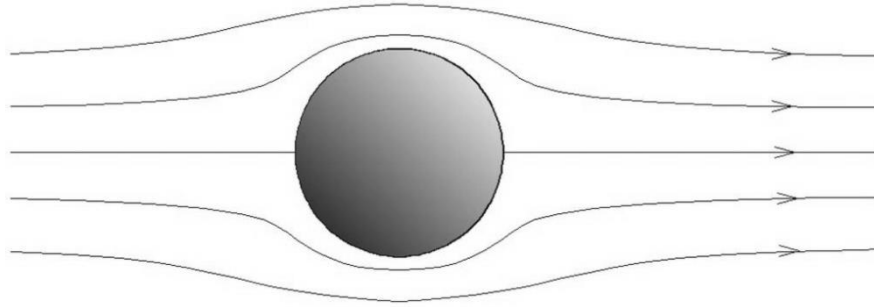


Slika 26. Slijeganje tla

Svakim pomakom čestice granulata u tijelu praga se na drugom dijelu javlja šupljina kroz koju se povećava protok što je glavni pokretač mehanizma rušenja. Bitno je gibanja čestica u tijelu praga svesti na najmanju moguću razinu. Drugi uzrok koji dovodi do pomaka čestica u tijelu praga su vibracije od unutarnjih procesa u tlu. Ti procesi mogu biti gibanje tektonike ili uobičajene litološke promjene.

Vibracije od vrtloženja kao uzrok mehanizma rušenja

Kod procjeđivanja vode kroz tijelo praga javlja se mehanizam opstrujavanja fluida oko čestica. Pretpostavkom da je fluid idealan i da su brzine strujanja male, opstrujavanjem bi strujnice i dalje bile glatke i paralelne. Takvo strujanje naziva se laminarno strujanje i prikazano je na slici 27. Čak i pri većim brzinama tj. pri većim Reynoldsovima brojima tok idealnog fluida ostao bi nerazdvojen [13]. U stvarnosti postoji samo realan fluid s karakteristikom viskoznosti stoga će se u nastavku opisati turbulentno strujanje.



Slika 27. Laminarno strujanje [5]

Reynoldsov broj računa se prema izrazu

$$Re = \frac{v \cdot d}{\vartheta} \quad (4.1)$$

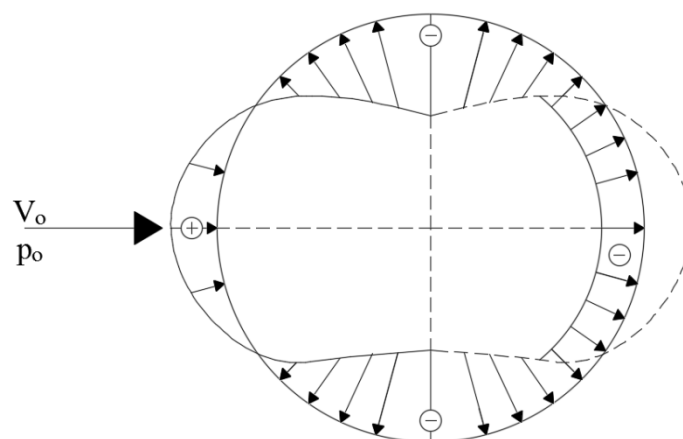
gdje je:

v - brzina strujanja fluida prije nailaska na česticu [m/s],

d - promjer čestice [m],

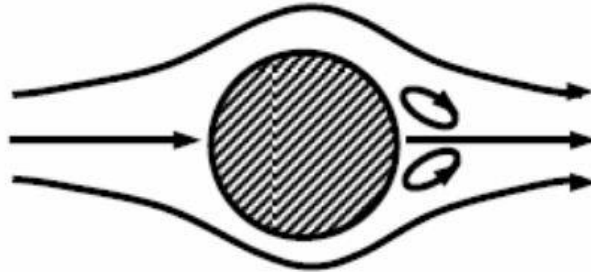
ϑ - kinematička viskoznost fluida [m²/s]

Pri većim Reynoldsonim brojevima, realan fluid nastrujava na čelo čestice i stvara se područje povišenog tlaka. Ukupna raspodjela tlakova na česticu prikazana je na slici 28.



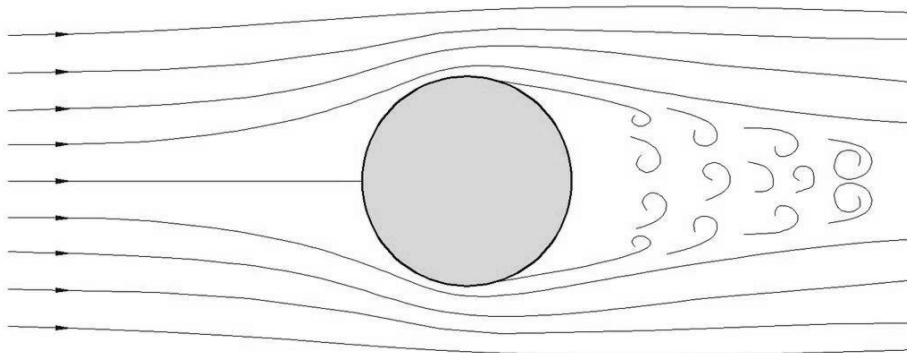
Slika 28. Raspodjela tlakova kod opstrujavanja realnog fluida oko čestice

Gibajući se dalje uz česticu, brzina fluida raste i na tim mjestima je tlak smanjen [14]. S obzirom da fluid gubi značajan dio energije na savladavanja sile trenja i ne posjeduje dovoljno brzine, strujanje će na zavjetrinskoj strani biti jako usporeno. Visoki vanjski tlak tada uzrokuje da se fluid krene gibati u suprotnom smjeru (slika 29).



Slika 29. Stvaranje vrtloga suprotnog smjera [15]

Nastaje vrtlog koji nazivamo Karmanovim vrtlogom. On se naposljetku otkida od graničnog sloja kao posljedica velike razlike u distribuciji tlakova. Otkinuti vrtlog putuje dalje sa strujom fluida stvarajući tako vrtložni trag [16]. Opisano strujanje nazivamo turbulentnim strujanjem (slika 30.) koje u prirodi ima značajan utjecaj na vibracije čestica prilikom procjeđivanja kroz tijelo praga.



Slika 30. Turbulentno strujanje [17]

5. Fizikalni model

5.1. Opis modela

Labaratorijsko izvođenje fizikalnog modela provedeno je u prostorijama zavoda za hidrotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Ispitivanje je provedeno na kanalu pravokutnog poprečnog presjeka širine 1,0 m koji funkcionira kao zatvoreni sustav. Voda se kontrolirano ulijeva u kanal pomoću crpke kapaciteta 25 l/s. Pomoću pripadnog elektromagnetnog mjerača protoka određuje se protok u kanalu. Nakon što voda od ulaska u sustav prođe cijelom dužinom kanala i dođe do izlazne točke, prolazi kroz niz rešetki koje na sebi zadržavaju granulat i ostale materijale korištene u modeliranju te na taj način čista voda odlazi u bazen iz kojeg će se opet preko crpke upumpavati u sustav. Bočne stranice kanala su staklene kako bi se promatračima omogućio nesmetani uvid u događanja i procese koji se odvijaju pri modelskom ispitivanju (slika 31). Kao što je već navedeno u prijašnjim poglavljima, ispitivanja će se provesti za modele lučnog i ravnog poprečnog praga. Kriterij ispitivanja, koji definira vezu između dimenzija fizikalnog modela sa dimenzijama prototipnog objekta, baziran je na teoriji sličnosti modela.



Slika 31. Poprečni prag u pokusnom kanalu

Teorija sličnosti, polazeći od sustava jednačbi koji opisuje promatranu pojavu, daje podlogu za modelska istraživanja (kriterije koje treba zadovoljiti da bi se rezultati s modelske pojave mogli preslikati na prototipnu pojavu) kako u mehanici fluida, tako i u svim ostalim granama fizike i tehnike.

Za dvije fizikalne pojave kaže se da su slične ako su opisane istim fizikalnim zakonima i ako se veličine u jednoj fizikalnoj pojavi (npr. na prototipnoj) mogu odrediti iz veličina druge fizikalne pojave (npr. modelske) jednostavnim množenjem konstante koja se naziva - koeficijent sličnosti.

Neke od teorija sličnosti su:

- Froudeova sličnost (promatra odnose inercijskih sila i gravitacije);
- Eulerova sličnost (promatra odnose sila tlaka i inercijske sile);
- Reynoldsova sličnost (promatra odnose inercijskih sila i viskoznosti);
- Stokesova sličnost (promatra odnose gravitacije i trenja) i dr.

Pokus će se bazirati na temelju Froudeove sličnosti (odnosi inercijskih sila i gravitacije), pošto su navedena djelovanja ove sličnosti dominantna za područje ispitivanja modela. Kao prototipnu bazu promatranja, uzet je TETO prag na rijeci Savi, stacionaža 697,6 km, zbog rušenja i saniranja koje se u povijesti često pojavljivalo

Za modelsko ispitivanje odabrano je mjerilo 1:100, te prema navedenoj teoriji sličnosti dobivena je geometrija praga:

- Dužina praga $L = 122$ cm,
- širina praga $B = 100$ cm,
- visina u kruni $H = 14$ cm,
- granulat $n = 1,6-3,2$ cm
- radijus krune i nožica praga (kod lučnog praga) $R = 100$ cm

U prirodi, prag bi trebao imati takav nizvodni nagib da maksimalno smanji erozijsku snagu vode koja nepovoljno utječe na produbljivanje korita. U modelu je odabran nagib pokosa 1:4. Navedeni proračun je prikazan u tablici 1.

Tablica 1. Kontrola modela prema teoriji sličnosti

PRETPOSTAVKE			
Pretpostavka širina fizikalnog modela je BM=100cm	BM	1.00	(m)
Pretpostavka - mjerilo modela je Lam= 100	Lam	100.00	1
Pretpostavka protok u prirodi je QP= 500	QP	500.00	(m ³ /s)
Pretpostavka - gustoća zrna u prirodi	rhoP	2650.00	(kg /m ³)
Pretpostavka gustoća zrna na modelu	rhoM	2825.00	(kg /m ³)
IZRAČUNATO			
Mjerilo protoka LamQ	LamQ	100000.00	1
Protok na modelu	QM	0.005	(m ³ /s)
Širina korita u prirodi	BP	100.00	(m)
KONTROLA FROUDEOVOG BROJA			
Brzina na modelu	Vmod	0.48	(m/s)
Brzina u prirodi	Vpri	4.80	(m/s)
Froudeov broj na modelu	FrM	2.35	1
Froudeov broj u prirodi	FrP	2.35	1

Za izvođenje modela praga korišten je kameni materijal granulacije 1,6 – 3,2 cm. Granulat se slagao na način da su se manja zrna koristila u potpovršinskim slojevima kao tijelo praga, a krupnija na površini kao obloga čija je uloga sprječavanje odnošenja čestica nizvodnog pokosa. Pri konstruiranju se također kontrolira i zbijenost materijala.

5.2. Opis ispitivanja

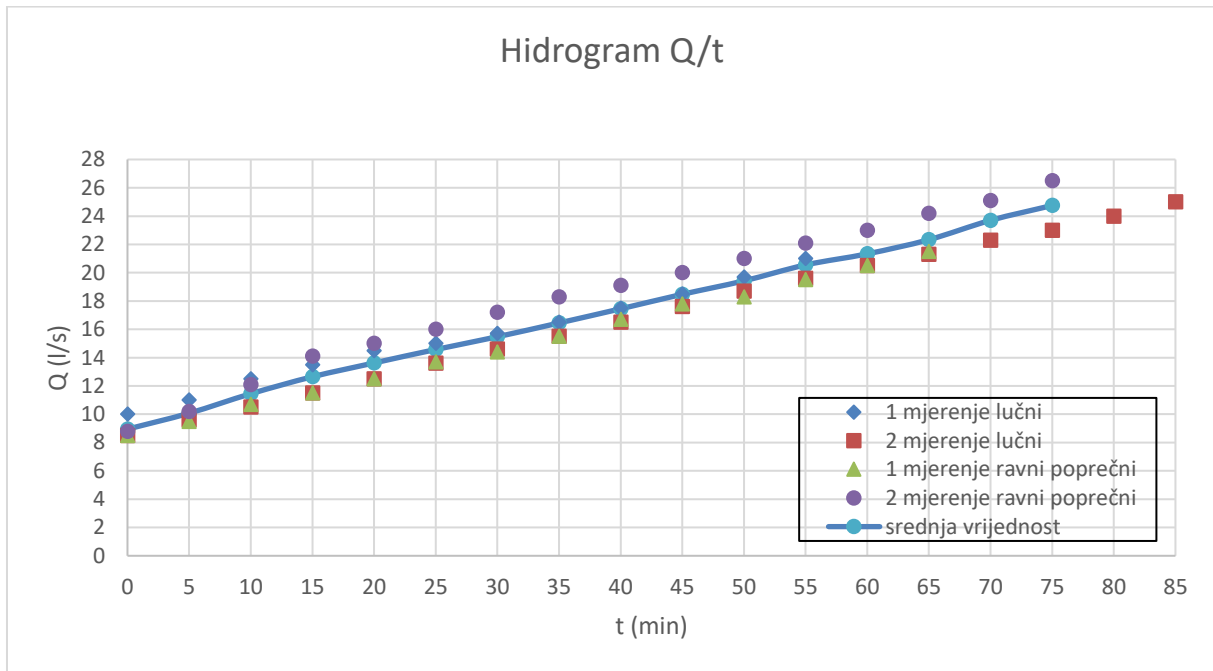
S obzirom da se radi o kontroliranom laboratorijskom ispitivanju u kanalu pravokutnog poprečnog presjeka, slijedi da je korito prizmatično, hrapavost duž kanala konstantna te geometrija kanala vremenski nepromjenjiva, tj. da je tečenje jednoliko. Jedini parametar koji se mijenja je sam oblik praga (ravni poprečni / lučni) te će se upravo ti oblici uspoređivati u stacionarnim uvjetima - pri konstantnim protocima.

Nakon što se složila konstrukcija praga, kanal se pomoću laboratorijske crpke počeo ispunjavati vodom. Protoci su se regulirano zadavali i kontrolirali pomoću elektromagnetnog mjerača protoka (slika 32). S obzirom da se radi o nekoherentnom materijalu, voda se najprije procjeđivala kroz konstrukciju, a zatim postepenom saturacijom dospjela do razine krune praga nakon čega je započelo prelijevanje. Ostvareni protok, potreban da započne prelijevanje nazvat će se nultim protokom te će on biti referentan protok od kojeg će se promatrati daljnji procesi degradacije praga.



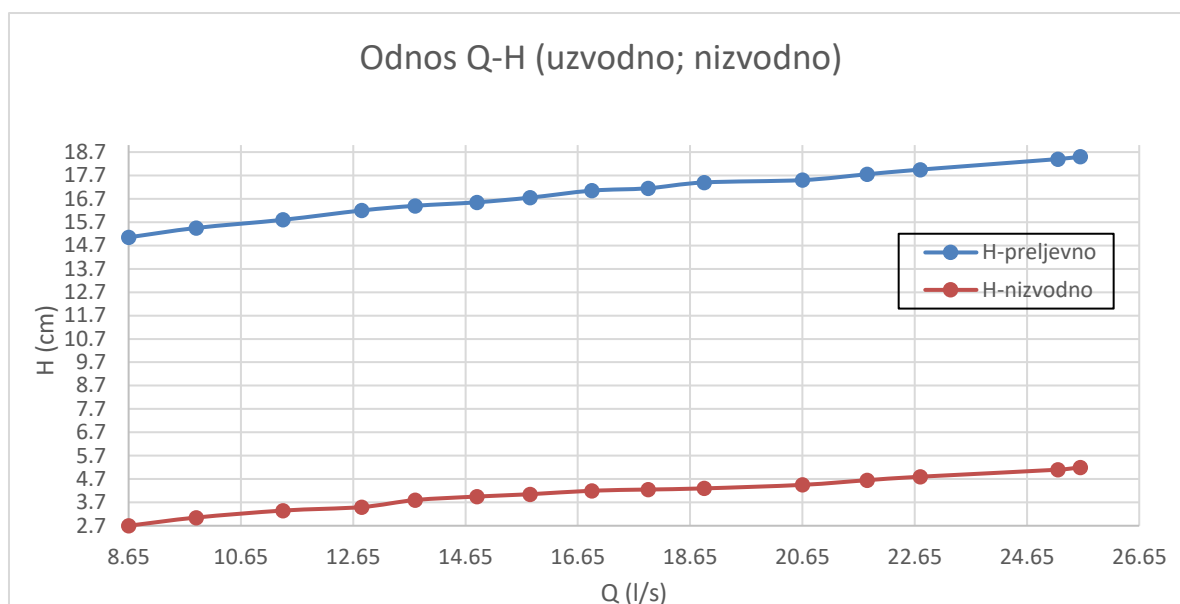
Slika 32. Elektromagnetni mjerač protoka

Definiranjem nultog protoka - protoka koji odgovara početnim gubicima na modelu, daljnji protoci postepeno se povećavaju svakih 5 minuta, za 0,5 – 1 (l/s). S obzirom da se radi o materijalu nejednolike granulometrije, pri opetovanom ponavljanju pokusa logično je da se neće moći postići isti uvjeti zbijenosti, odnosno početni gubici neće biti jednaki za svaki slučaj ispitivanja. Srednja vrijednost hidrograma prikazana je na slici 33. za četiri mjerenja ravnog poprečnog i lučnog praga koja su uzeta kao referentna.



Slika 33. Srednja vrijednost hidrograma

Na hidrogramu je uočljivo kako protoci pri kojima se javlja prelijevanje ne započinju od nule, već od vrijednosti koje se kreću između 6 i 10 [l/s], a koje predstavljaju početne gubitke od procjeđivanja.



Slika 34. Srednja vrijednost uzvodne i nizvodne dubine

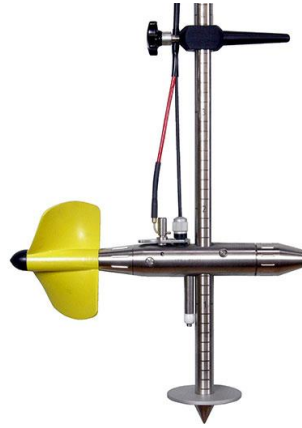
Za četiri navedena mjerenja također su prikazane srednje vrijednosti preljevni visina i nizvodnih dubina (iza nožice praga). Ovaj podatak će se razmatrati radi stabilizacije vodnog skoka.

Paralelno s početkom prelijevanja vode preko krune započinje se s mjerenjem brzine vode hidrometrijskim krilom u neposrednoj blizini nizvodne nožice praga (slika 35). Brzina se mjeri na tri lokacije pomoću hidrometrijskog krila: na lijevoj i desnoj strani kanala te u sredini kanala. Ove tri lokacije su odabrane s obzirom na očekivane različite koncentracije strujnica fluida s obzirom na oblik praga, odnosno kod lučnog se očekuje koncentracija brzina u središtu, a kod ravnog podjednaka raspodjela duž kanala.



Slika 35. Mjerenje brzina pomoću hidrometrijskog krila

Hidrometrijsko krilo (slika 36.) je jednostavan instrument koji služi za mjerenje brzine vode u vodotocima. Sastoji se od tijela instrumenta na kojemu se nalazi propeler koji se okreće oko osi usporedne s vodotokom. Elektronički uređaj koji je spojen na hidrometrijsko krilo mjeri broj okretaja propelera n [okr/s].



Slika 36. Hidrometrijsko krilo [18]

Pri modelskom ispitivanju odabrano referentno vrijeme mjerenja broja okretaja je 20 sekundi. Brzina vode se određuje prema unaprijed određenim formulama (zadanim od proizvođača uređaja - PROPEL 0100-133) za izmjereni broj okretaja:

$$n < 1,16 \rightarrow v = 10,57 \cdot n + 1,9 \quad (5.1)$$

$$n > 1,16 \rightarrow v = 10,26 \cdot n + 2,26 \quad (5.2)$$

gdje je:

n – broj okretaja propelera u sekundi [1]

v – brzina vode [cm/s]



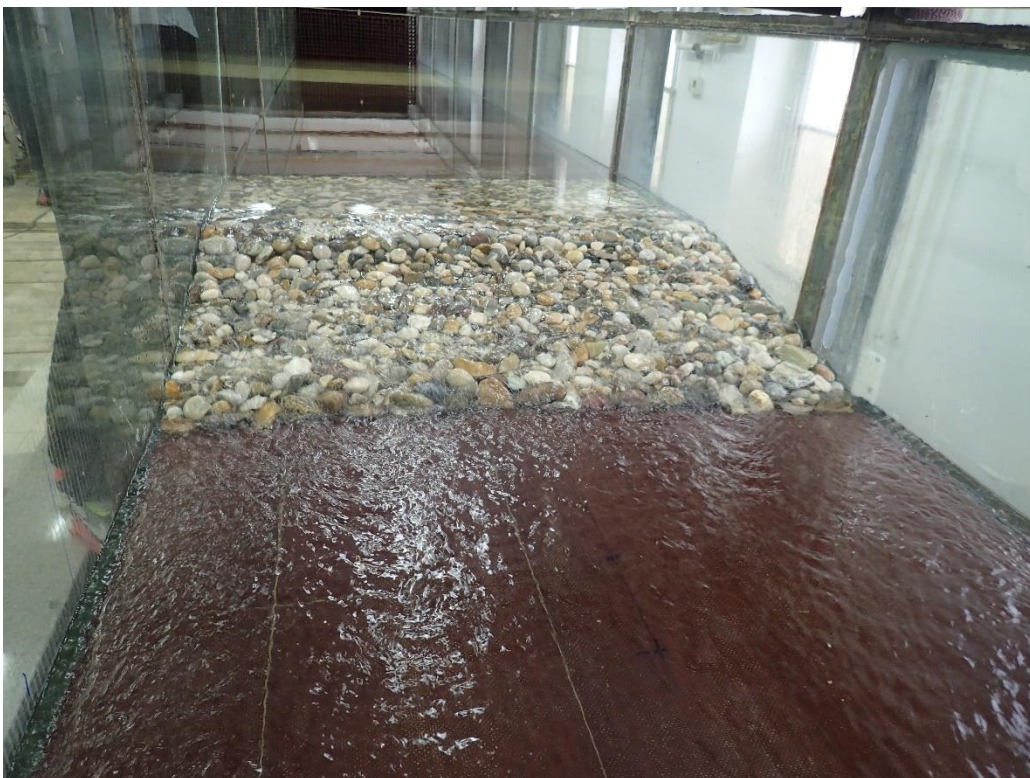
Slika 37. Podvodni prikaz propelera hidrometrijskog krila kojim mjerimo brzine

S obzirom da se želi dokazati doprinos uklještenja na izdržljivost i trajnost lučnog praga u odnosu na ravni poprečni, uz nizvodne brzine mjerit će se i broj odnesenih čestica. Za svaki protok bilježit će se broj pripadnih odnesenih čestica sve do degradacije krune preljeva koja će se proglasiti slomom konstrukcije. Promatrat će se i zapisivati rezultati mjerenja, a njihova obrada i zaključci bit će izneseni u daljnjem tekstu.

5.3. Ravni poprečni prag - opis i obrada izlaznih rezultata

Pokus R-1

U prvom pokusu prag je složen nasumičnim rasporedom čestica. Prilikom slaganja nizvodnog pokosa nije se biralo veće kamenje na površini kako bi ga stabiliziralo i preuzelo ulogu obloge (slika 38). Također, materijal se nije naknadno zbijao iz čega slijedi da je pripadna otpornost fluvijalnoj eroziji postignuta samo pod utjecajem težine gornjih slojeva čestica, tj. time je smanjen utjecaj uklještenosti.



Slika 38. Ravni poprečni prag

Zaključak

S obzirom da nije biran raspored čestica materijala, te samim time dodatno zaštićena površina pokosa praga, već pri malim protocima nastupa postepeno odnašanje manjih čestica s površine nizvodnog pokosa. Odnosjenjem pojedinih čestica dolazi do lokalne nestabilnosti koja za posljedicu prouzrokuje sve veću i bržu degradaciju nizvodne nožice, a na kraju i slom konstrukcije pri protoku od 18 [l/s].

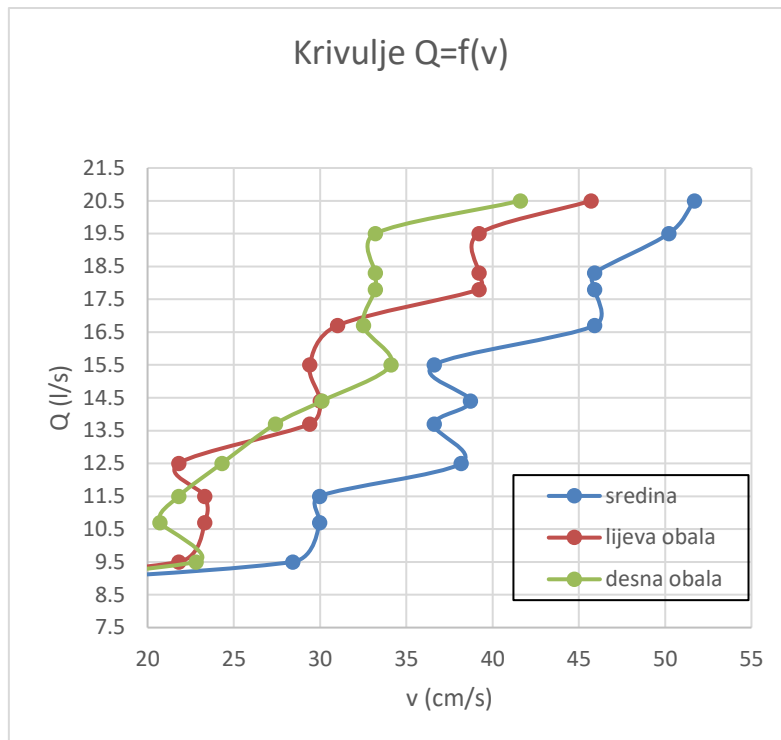
Pokus R-2

U drugome pokusu ispitivanja ravnog praga, s obzirom na zaključke iz prvog pokusa, prag je složen na način da se birao raspored slaganja čestica. Sitnije čestice stavljane su u potpovršinske slojeve, a krupnije na površinu tako da svojom većom težinom odolijevaju hidrodinamičkoj i ostalim destabilizirajućim silama vode. Također, konstrukcija se naknadno zbijala kako bi se postigla što bolja uklještenost i zbijenost materijala. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 2. Boljom zbijenošću smanjio se nulti protok zbog toga što su gubici od procjeđivanja kroz zbijeniji prag manji.

Tablica 2. Rezultati drugog pokusa za ravni prag

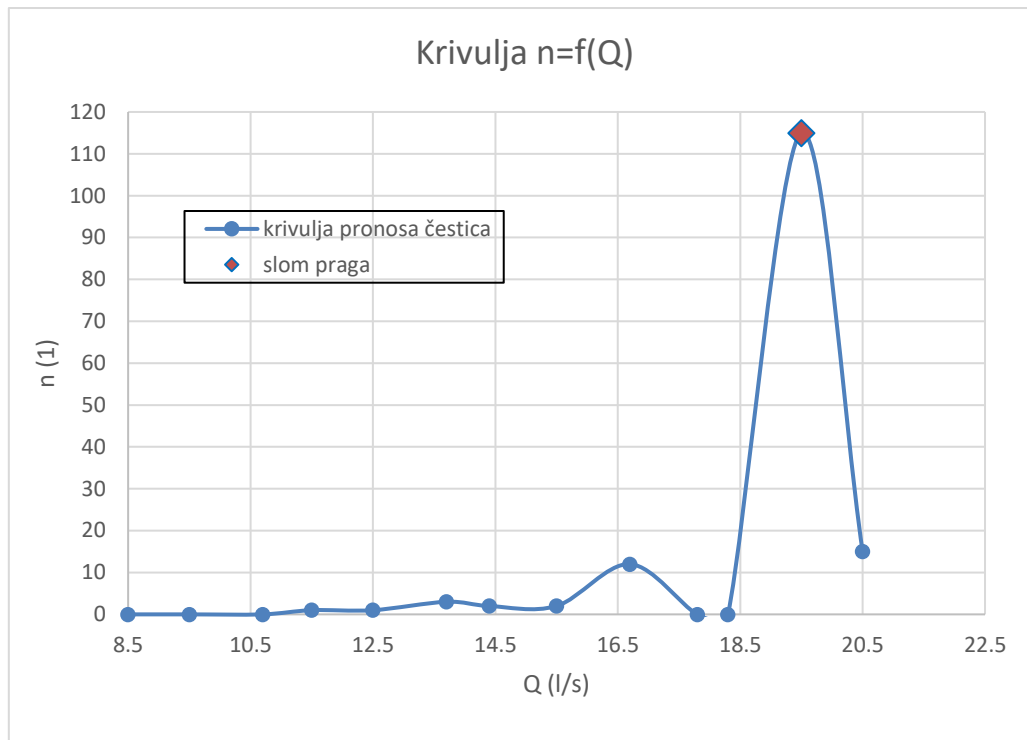
RAVNI POPREČNI PRAG (2.pokus)									
	vrijeme	protok	odnešen materijal	razina vode uzvodno - h_1	razina vode nizvodno - h_2	brzina-sredina korita - v_1	brzina lijevo - v_2	brzina desno - v_3	napomena
	t (min)	Q (l/s)	n (1)	(cm)	(cm)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	/
1	0	8.5	/	15	2.5	0	0	0	
2	5	9.5	/	15.3	3	28.4	21.8	22.8	
3	10	10.7	/	15.6	3.2	29.96	23.3	20.7	
4	15	11.5	1	15.8	3.3	29.96	23.3	21.8	
5	20	12.5	1	16.1	3.6	38.17	21.8	24.3	
6	25	13.7	3	16.3	3.8	36.6	29.4	27.4	
7	30	14.4	2	16.4	3.9	38.7	30	30.1	
8	35	15.5	2	16.8	4	36.6	29.4	34.1	
9	40	16.7	12	16.9	4.1	45.9	31	32.5	
10	45	17.8	/	17.2	4.1	45.9	39.2	33.2	
11	50	18.3	/	17.2	4.1	45.9	39.2	33.2	
12	55	19.5	115	17.5	4.5	50.2	39.2	33.2	SLOM PRAGA
13	60	20.5	15	17.7	4.6	51.7	45.7	41.6	

Prema tabličnom zapisu vidljivo je kako metoda naknadnog zbijanja materijala, kao i postavljanje krupnijih čestica na površinu pokosa daje bolje rezultate u odnosu na prvi pokus. Naime, povećala se veličina protoka pri kojoj nastupa slom konstrukcije na 19,5 [l/s]. Također, vršeno je mjerenje brzina i odnošenje granulata u funkciji protoka.



Slika 39. Ovisnost promjene brzina o povećanju protoka za pokus R-2

Prema grafu na slici 39. u kojem se naznačuje ovisnost promjene brzina nizvodno od praga o povećanju protoka, vidljiva su određena odstupanja od povećanja brzine paralelno sa povećanjem protoka. Brzine u jednom trenutku rastu pa padaju - graf u obliku nazubljene pile. Ova odstupanja nastaju, naravno osim faktora ljudske greške pri procesu slaganja praga, i radi nejednolikog granulata. Iz navedenog slijedi kako se na pojedinim lokalnim područjima nizvodnog pokosa nalazi sitniji granulat, gdje će prije doći do odnašanja materijala u odnosu na područja pokrivena krupnijim i težim granulatom koji će biti otporniji na povećanje protoka. Na onim dijelovima gdje je započeto odnašanje materijala javljaju se veće brzine nego li na dijelovima gdje je konstrukcija pokosa još uvijek postojana. Granulat se ne pronosi samo u nizvodne dijelove kanala već se i lokalno premješta s jednog kraja pokosa na drugi, te na taj način remeti strujnu sliku. Kako se ispitivanje brzine uvijek vrši na istom mjestu, rezultat su ovakvi skokovi u promjenama brzina koji se uočavaju na slici 39.



Slika 40. Ovisnost odnošenja čestica o promjeni protoka za pokus R-2

Zaključak

Prema rezultatima mjerenja dokazano je da se poboljšanjem tehnike izvođenja praga - naknadnim zbijanjem i odabirom granulata, dobiva veća otpornost praga. Najveće brzine vode javljaju se u središtu kanala te će ovo područje biti najkritičnije s obzirom na nizvodnu eroziju.

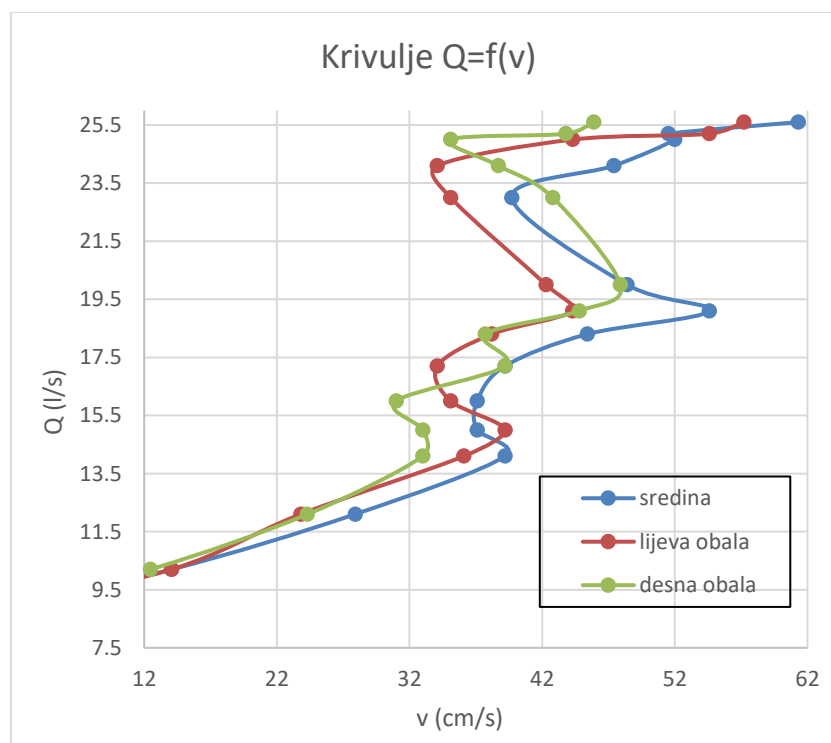
Pokus R-3

Pri trećem ispitivanju ravnog poprečnog praga teži se izgradnji što čvršće konstrukcije kako bi se pokazalo da i ovakav čvrsto složen oblik neće biti otporniji u odnosu na lučni prag. Pri izradi konstrukcije vršen je ponovni odabir granulata u kojem je još krupniji i kvalitetniji slagan na nizvodni pokus. Zbijenost se još više kontrolira i povećava, a geometrija teži što ravnijim i ujednačenijim ploham (što bliže šablonskoj shemi s obzirom na mogućnosti oblikovanja dostupnog materijala -kamen). Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Rezultati trećeg pokusa za ravni prag

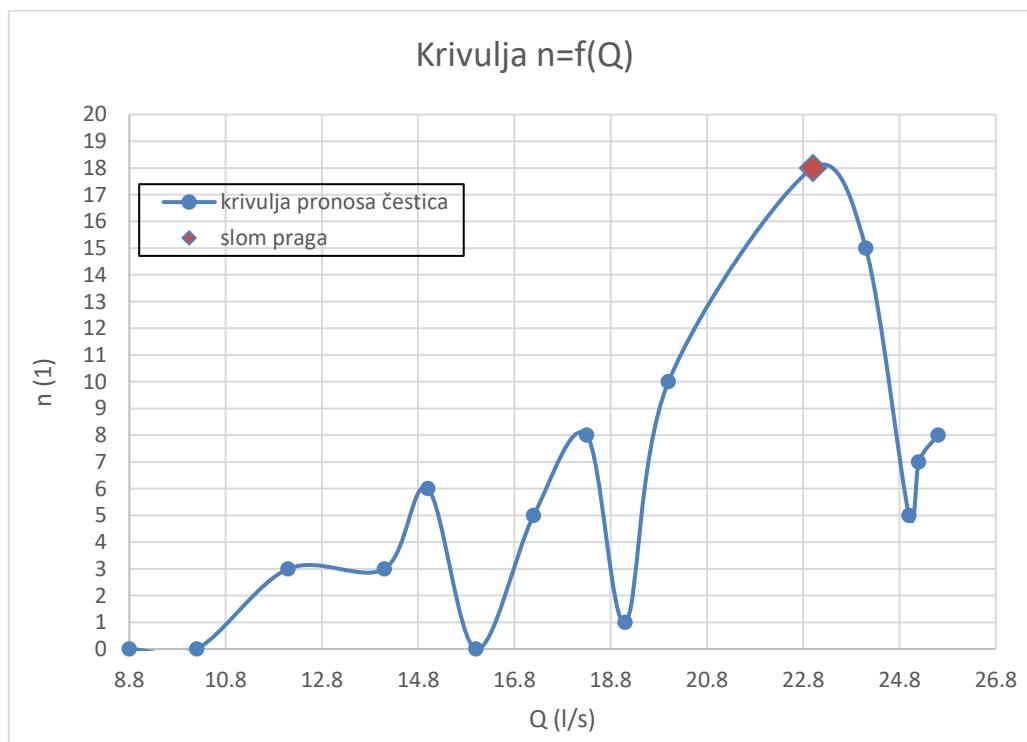
RAVNI POPREČNI PRAG (3.pokus)									
	vrijeme	protok	odnešen materijal	razina vode uzvodno - h_1	razina vode nizvodno - h_2	brzina-sredina korita - v_1	brzina lijevo - v_2	brzina desno - v_3	napomena
	t (min)	Q (l/s)	n (1)	(cm)	(cm)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	/
1	0	8.8	/	15.1	2.9	0	0	0	
2	5	10.2	/	15.6	3.1	14.06	14.06	12.47	
3	10	12.1	3	16	3.5	27.9	23.8	24.3	
4	15	14.1	3	16.6	3.7	39.2	36.1	33	
5	20	15	6	16.7	4	37.1	39.2	33	
6	25	16	/	16.8	4.1	37.1	35.1	31	
7	30	17.2	5	17.1	4.2	39.2	34.1	39.2	
8	35	18.3	8	17.3	4.4	45.4	38.2	37.7	
9	40	19.1	1	17.4	4.4	54.6	44.3	44.8	
10	45	20	10	17.6	4.5	48.4	42.3	47.9	
11	50	23	18	17.8	4.8	39.7	35.1	42.8	SLOM PRAGA
12	55	24.1	15	18	4.8	47.4	34.1	38.7	
13	60	25	5	18.2	5	52	44.3	35.1	
14	65	25.2	7	18.4	5.1	51.5	54.6	43.8	

Iz tabličnog zapisa rezultata vidljivo je kako slučaj slaganja konstrukcije naveden u gornjem tekstu daje najbolje rezultate otpornosti. Prag je u odnosu na prethodne modele značajno postojaniji i sposobniji izdržati velike protoke.



Slika 41. Ovisnost promjene brzina o povećanju protoka za pokus R-3

Prema grafu na slici 41. vidljivo je da se u slučaju najkvalitetnijeg slaganja i zbijanja materijala postižu ujednačenije brzine duž ukupne širine praga. Skokovi u brzinama rezultat su lokalnog odnošenja i premještanja materijala, odnosno remećenja strujne slike što je pobliže objašnjeno u drugom pokusu ravnog poprečnog praga – pokus R2.



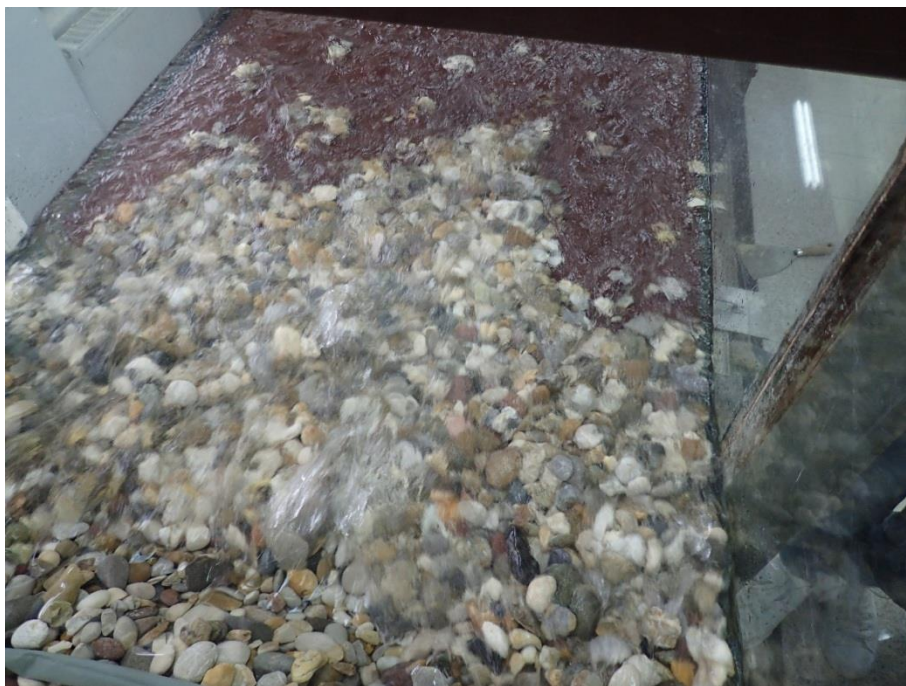
Slika 42. Ovisnost odnošenja čestica o promjeni protoka za pokus R-3

Zaključak

Iz rezultata u trećem ispitivanju dokazano je da se još većim povećanjem zbijenosti materijala i idealiziranjem geometrije praga dobivaju značajna poboljšanja u svim mjerenjima. Brzine su cijelom dužina praga veće i ujednačenije u odnosu na prethodna ispitivanja. Preljevna visina i dubina vode nizvodno od praga su veća u odnosu na drugo ispitivanje, a značajno veća u odnosu na prvo ispitivanje. Odnosa materijala je značajno manje s obzirom na prijašnje pokuse zbog većeg kamenja koje je slagano na nizvodnom pokusu i tako preuzelo ulogu obloge praga. Slom konstrukcije nastupio je pri najvećem broju odnesenog materijala kada je počelo razaranje krune (slike 43 i 44). Protok pri slomu konstrukcije iznosi 23 [l/s], što je značajno više u odnosu na drugi 19,5 [l/s] i prvi 18 [l/s] pokus. Ovaj prag je namjerno predimenzioniran većim kamenjem kako bi se u slučaju dobivanja sličnih rezultata dokazala prednost lučnog praga.



Slika 43. Poprečni prikaz sloma ravnog poprečnog praga i odnašanje krune



Slika 44. Tlocrtni prikaz sloma ravnog poprečnog praga i odnašanje krune

5.4. Lučni prag - opis i obrada izlaznih rezultata

Pokus L-1

Uspoređujući ravni poprečni i lučni prag korištene su iste tehnike slaganja za oba ispitivanja s ciljem dobivanja što vjerodostojnijih rezultata. Kao što je u prvom ispitivanju za ravni poprečni prag nije bio biran granulat, niti se konstrukcija naknadno zbijala, identična metoda slaganja primijenjena je i za prvo ispitivanje lučnog praga. Jedini varirajući parametar je oblik praga (slika 45). Pri protoku od 18,1 [l/s] počinje naglo odnošenje sitnijih čestica s pokosa. Nožica nizvodnog pokosa gubi stabilnost i nastupa slom konstrukcije. Uspoređujući prve pokuse lučnog i ravnog poprečnog praga, vidimo da protok koji uzrokuje slom ravnog poprečnog u pokusu R-1 iznosi 18,5 [l/s], a lučnog praga L-1 iznosi 18,1 [l/s].



Slika 45. Lučni prag

Zaključak

Lučni se prag u prvom ispitivanju srušio pri manjem protoku u odnosu na ravni poprečni. Uzrok ranijeg sloma je promjena smjera toka vode kao posljedica promjene oblika – iz ravnog u lučni. Slaganjem se materijal samo rasporedio po širini kanala, ne pazeći na raspored krupnijeg granulata u središtu nizvodnog pokosa. Uzvodno akumulirana energija vode, prelijeva se preko krune lučnog praga na način da se koncentrira u centar te tako odnosi sitne čestice sa središta pokosa (slika 46). Odnosenje sitnih čestica sa središta praga uzrokuje daljnju degradaciju.



Slika 46. Rušenje lučnog praga

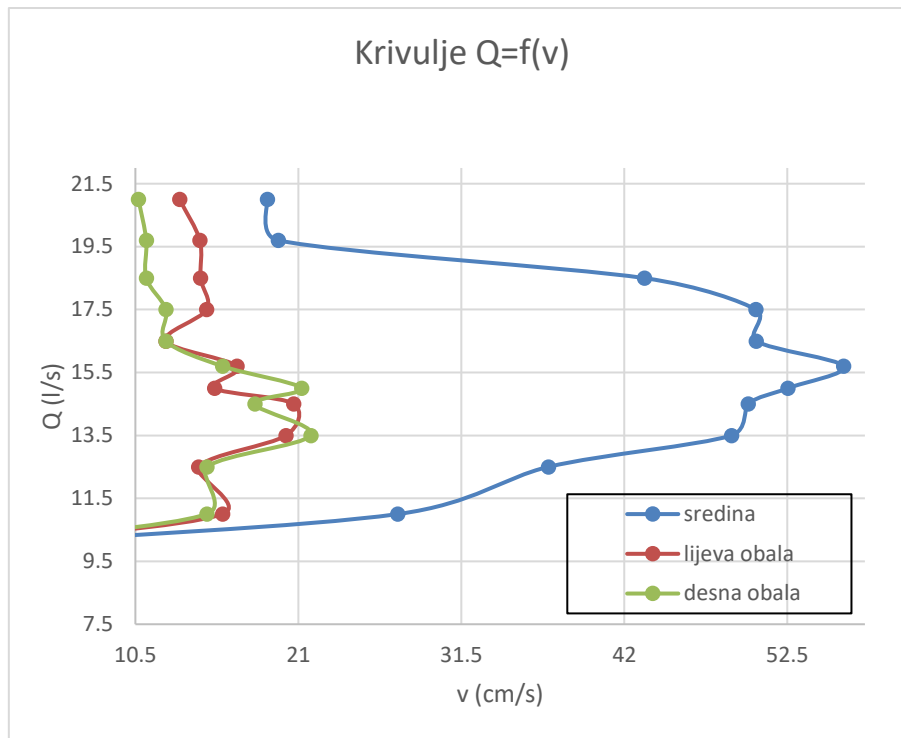
Pokus L-2

U drugom ispitivanju lučnog praga, metoda slaganja je ista kao i kod drugog ispitivanja za ravni poprečni prag. S obzirom na brzo urušavanje materijala u rastresitom stanju iz prvog ispitivanja, sada se veći granulat slaganjem koncentrira na sredini površine nizvodnog pokosa. Također se vrši naknadno zbijanje kako bi se povećala kohezija među česticama. Rezultati ispitivanja zabilježeni su u tablici 4.

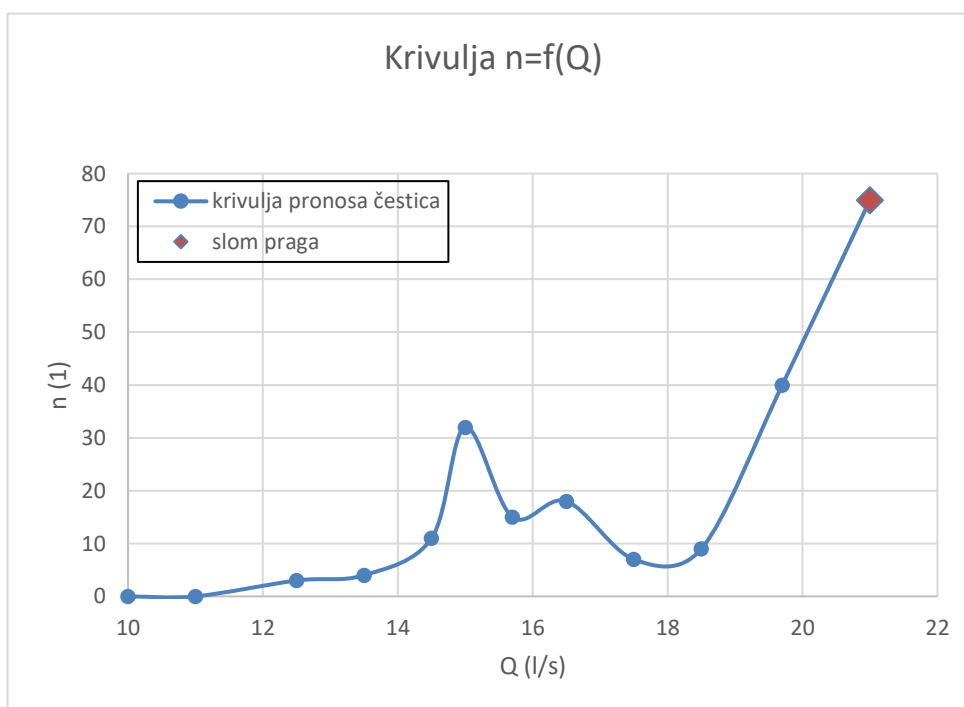
Tablica 4. Rezultati drugog pokusa za lučni prag

LUČNI PRAG (2.pokus)								
	vrijeme	protok	odnešen materijal	razina vode uzvodno - h_1	brzina-sredina korita - v_1	brzina lijevo - v_2	brzina desno - v_3	napomena
	t (min)	Q (l/s)	n (1)	(cm)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	/
1	0	10	/	15.7	0	0	0	
2	5	11	/	16.1	27.4	16.11	15.1	
3	10	12.5	3	15.5	37.1	14.57	15.1	
4	15	13.5	4	16.6	48.9	20.2	21.8	
5	20	14.5	11	16.7	49.97	20.7	18.2	
6	25	15	32	16.8	52.53	15.6	21.2	
7	30	15.7	15	16.9	56.13	17.05	16.11	
8	35	16.5	18	16.7	50.5	12.47	12.47	
9	40	17.5	7	16.7	50.48	15.09	12.47	
10	45	18.5	9	16.65	43.3	14.7	11.2	
11	50	19.7	40	16.6	19.7	14.65	11.2	
12	55	21	75	16.5	19	13.35	10.7	SLOM PRAGA

Prema dobivenim rezultatima vidljivo je da slom lučnog praga nastupa pri protoku od 21 [l/s], a ravni poprečni prag pri 20,5 [l/s]. Razlike izmjerenih brzina između lijeve i desne strane obala praga odstupaju zbog parcijalnog lokalnog odnošenja i premještanja materijala koji djeluje na strujnu sliku. Iz ovisnosti promjene brzina o povećanju protoka (slika 47.), možemo uočiti odstupanje brzina u odnosu na lijevu i desnu stranu kanala. Razlog tome je geometrijski oblik lučnog praga čiji je učinak koncentracija strujnica prema centru zakrivljenosti.



Slika 47. Ovisnost promjene brzina o povećanju protoka za pokus L-2



Slika 48. Ovisnost odnošenja čestica o promjeni protoka za pokus L-2

Zaključak

Izvedbom lučnog praga u drugom ispitivanju pri istim uvjetima izgradnje kao i u pokusu R-2, dobiveni su bolji rezultati u pogledu protoka pri kojem nastupa lom i broja ukupnih odnesenih čestica. Ipak, uočili su se nedostaci koji na lokalnoj razini uzrokuju povećanu eroziju konstrukcije u odnosu na ravni poprečni prag. Naime, radi samog lučnog oblika voda se prelijeva pod utjecajem gravitacije koncentrirajući se ka središtu luka, time izazivajući puno veće brzine vode po srednjem dijelu nizvodnog pokosa u odnosu na bočne dijelove. S obzirom da sila raste s kvadratom brzine, upravo će ovo biti najkritičnije mjesto na pragu. Adekvatnim ojačanjem kritične sredine nizvodnog pokosa i slapišta, luk će se pokazati kao izdržljiviji oblik za izvedbu praga.

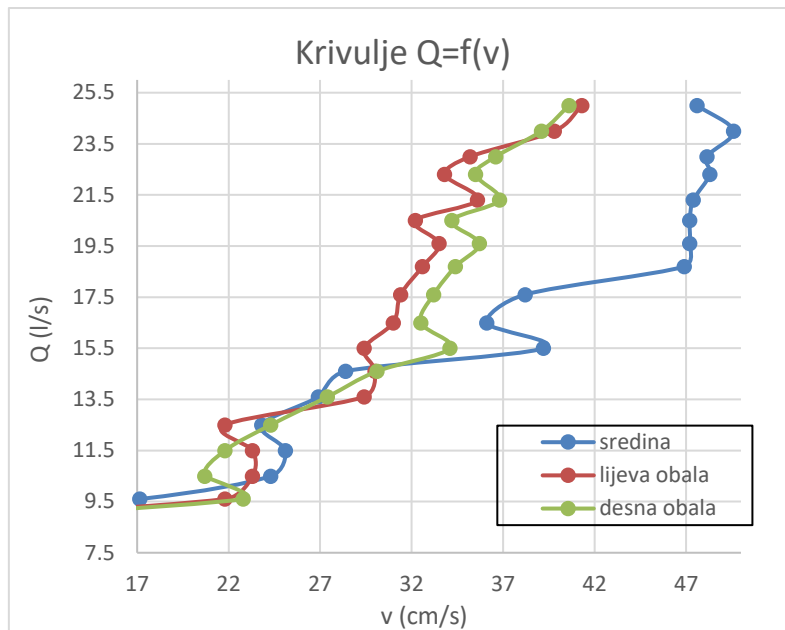
Pokus L-3

S obzirom na zaključke iz drugog ispitivanja lučnog praga, u trećem ispitivanju će se težiti optimizaciji oblika konstrukcije praga. U ovom slučaju će se ispitati promjena geometrije same krune pazeći pritom na dosljednost načina izgradnje. Analogno trećem pokusu ravnog poprečnog praga, površina nizvodnog pokosa će se ojačati većim granulatom uz naknadno zbijanje materijala. Promjena oblika krune izvest će se tako da srednji dio krune bude viši u odnosu na lijevi i desni dio krune uz obale. Razlog ovakvom oblikovanju su velike brzine koje se koncentriraju na srednjem dijelu nizvodnog pokosa praga. Pretpostavlja se da će ova promjena utjecati na strujnu sliku srednjeg dijela nizvodnog pokosa te da će se energija jednoličnije rasporediti po cijeloj širini praga. Dobiveni rezultati su prikazani u tablici 5.

Tablica 5. Rezultati trećeg pokusa za lučni prag

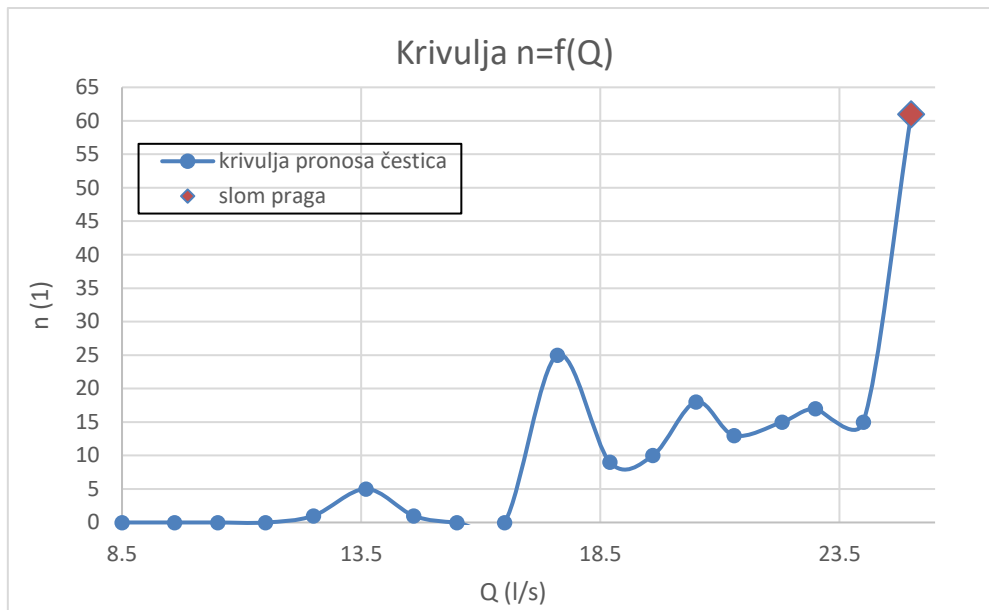
LUČNI PRAG (3.pokus)								
	vrijeme	protok	odnešen materijal	razina vode uzvodno - h_1	brzina-sredina korita - v_1	brzina lijevo - v_2	brzina desno - v_3	napomena
	t (min)	Q (l/s)	n (1)	(cm)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	/
1	0	8.5	/	15.6	0	0	0	
2	5	9.6	/	16	17.14	21.8	22.8	
3	10	10.5	/	16.4	24.3	23.3	20.7	
4	15	11.5	/	16.7	25.1	23.3	21.8	
5	20	12.5	1	17	23.81	21.8	24.3	
6	25	13.6	5	17.2	26.9	29.4	27.4	
7	30	14.6	1	17.5	28.4	30	30.1	
8	35	15.5	/	17.6	39.2	29.4	34.1	
9	40	16.5	/	17.9	36.1	31	32.5	
10	45	17.6	25	18.1	38.2	31.4	33.2	
11	50	18.7	9	18.3	46.9	32.6	34.4	
12	55	19.6	10	18.4	47.2	33.5	35.7	
13	60	20.5	18	18.6	47.2	32.2	34.2	
14	65	21.3	13	18.7	47.4	35.6	36.8	
15	70	22.3	15	18.8	48.3	33.8	35.5	
16	75	23	17	18.9	48.14	35.2	36.6	
17	80	24	15	19	49.6	39.8	39.1	
18	85	25	61	18.8	47.6	41.3	40.6	SLOM PRAGA

Promatranjem rezultata uočljiv je učinak veće zbijenosti u vidu manjih početnih gubitka nego li kod pokusa L-1 i L-2. Također, protoci koje podnosi prag su znatno veći u odnosu na sva ostala ispitivanja. Slom konstrukcije dogodio se pri protoku koji iznosi 25 [l/s], usporedbe radi protok kod loma u pokusu L-2 iznosi 21 [l/s], a u pokusu L-1 18,5 [l/s]. Promjenom geometrije krune pridonijelo se ujednačenijim brzinama duž cijele širine praga, naime maksimalne brzine u pokusu L-1 sežu do 61,3 [cm/s], u pokusu L-2 do 56,13 [cm/s], a u pokusu L-3 do samo 49,6 [cm/s]. Iz navedenog slijedi kako smo promjenom geometrije krune, odnosno njenim spuštanjem od sredine prema korijenu praga, postigli rasterećenje središnjeg dijela nizvodnog pokosa. Grafički prikazi ovisnosti protoka, brzina i odnošenja čestica nalaze se na slikama 49 i 50.



Slika 49. Ovisnost promjene brzina o povećanju protoka za pokus L-3

Prema grafičkom prikazu promjene brzine pri povećanju protoka jasno je vidljivo da su razlike u brzinama u sredini te na lijevoj i desnoj obali ujednačene sve do protoka od 17 [l/s], a tek nakon toga počinju određena odstupanja. Također se ovim oblikom krune voda više ne koncentrira po sredini nizvodnog pokosa, nego se prelijeva tako da većim brzinama dolazi s lijeve i desne strane praga. Bočni mlazovi vode teže ka centru luka gdje u međusobnom kontaktu troše energiju sudarajući se. Na taj način se, naspram ostalih ispitivanja, smanjuje ukupna energija i maksimalna brzina na nizvodnom dijelu vodotoka.



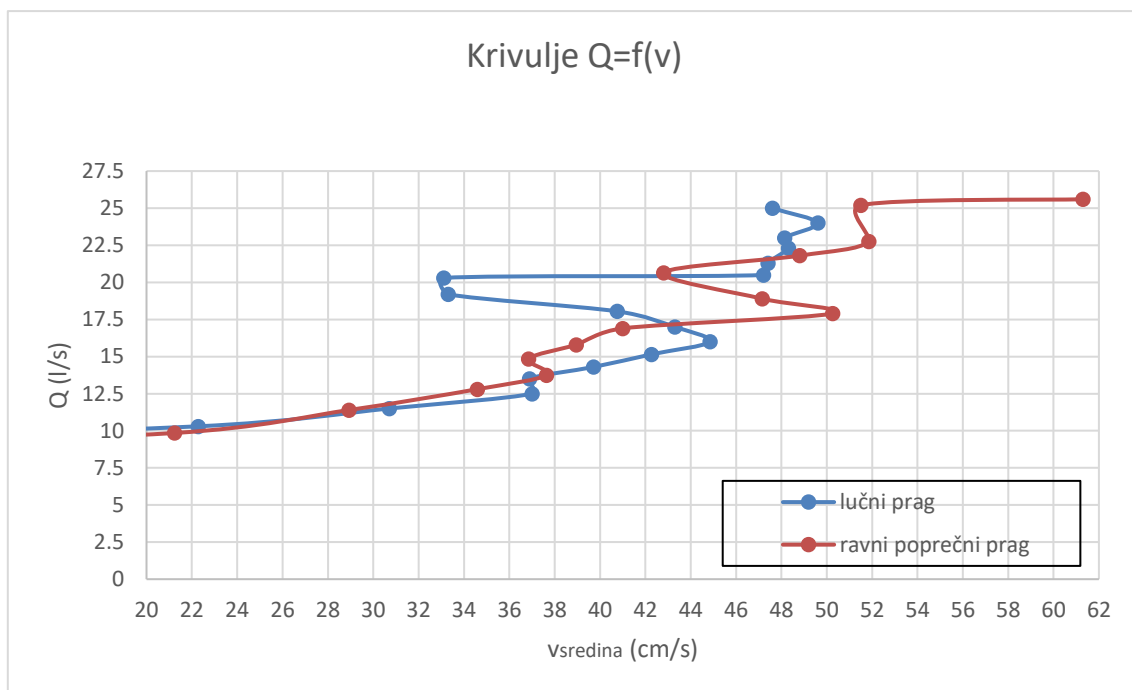
Slika 50. Ovisnost odnošenja čestica o promjeni protoka za pokus L-3

Zaključak

Ispitivanjem te obradom rezultata trećeg pokusa lučnog praga, dokazana je početna premisa o razlaganju koncentracije brzina sa sredine praga promjenom geometrije krune, odnosno njenim blagim padom od središta praga prema obalama (rubovima kanala) simetrično s jedne i druge strane. Ovom promjenom geometrije dobiven je najstabilniji prag koji svojom uklještenošću, načinu prijenosa opterećenja i usmjeravanja vode od obala (koje su kritično područje), može primiti, odnosno premostiti najveće protoke u odnosu na druga ispitivanja. Detaljnija usporedba negativnih i pozitivnih razlika lučnog praga u odnosu na ravni poprečni prag je obrađena u slijedećem poglavlju.

5.5. Usporedba ravnog poprečnog i lučnog praga

Ravni poprečni i lučni prag iako u globalnom pogledu služe za istu svrhu, veoma su različiti prema načinu funkcioniranja te kao takvi imaju prednosti i nedostatke u primjeni. Provedena su po tri ispitivanja za ravni poprečni i lučni prag u kojima je mjeren protok koji konstrukcija praga može podnijeti do sloma, brzine koje se razvijaju pri nizvodnoj nožici praga, razine preljevni visina i dubine vode nizvodno od praga te odnošenje čestica gradiva praga pri određenim protocima. Kako su svi pokusi provedeni istim metodama i parametrima (osim samog oblika konstrukcije – ravni poprečni / lučni), iz prikaza rezultata izbacit će se prvi pokusi (L-1 i R-1) te će se vršiti usporedba na temelju drugog i trećeg pokusa koji su s obzirom na kvalitetu izvedbe uzeti kao referentni primjeri. Rezultati drugog i trećeg pokusa prikazat će se preko srednje vrijednosti između istoimenih mjerenja.

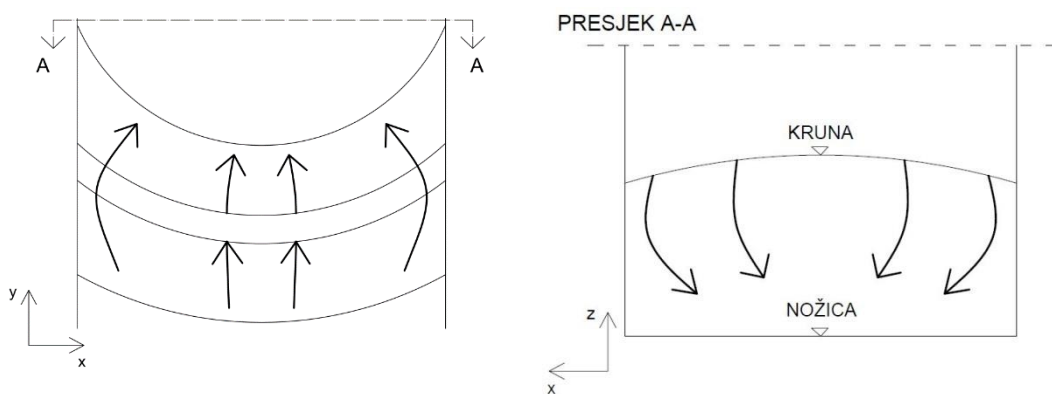


Slika 51. Ovisnost povećanja protoka na crpki i brzina na ulazu u slapište u sredini korita za ravni poprečni i lučni prag

Na kumulativnom grafu srednjih vrijednosti drugog i trećeg mjerenja za ravni poprečni i lučni graf, vidljivo je kako su brzine na lokaciji sredine praga ujednačenije i općenito manje kod lučnog praga u odnosu na ravni poprečni prag. Ovakvi nepravilni grafovi (oblik nazubljene pile) razlog su lokalne degradacije i premještanja materijala na samoj

konstrukciji s jedne lokacije na drugu. Ova pojava značajno utječe na strujnu sliku brzina po samom nizvodnom pokosu, a kako se brzine uvijek očitavaju na istome mjestu, rezultat su ovakvi zupčasti grafovi. Odnosno, kako se materijal pri određenom protoku u procesu ispiranja pronese s npr. krila praga na sredinu praga, tada će na toj lokaciji pronos remetiti strujnu sliku, što će kao rezultat za veći protok dati očitavanje manje brzine na istoj lokaciji ili obratno. Iz ovog se razloga pri modeliranju za stvarne potrebe provodi veliki broj pokusa koji se statistički obrađuju u cilju dobivanja što mjerodavnijih rezultata.

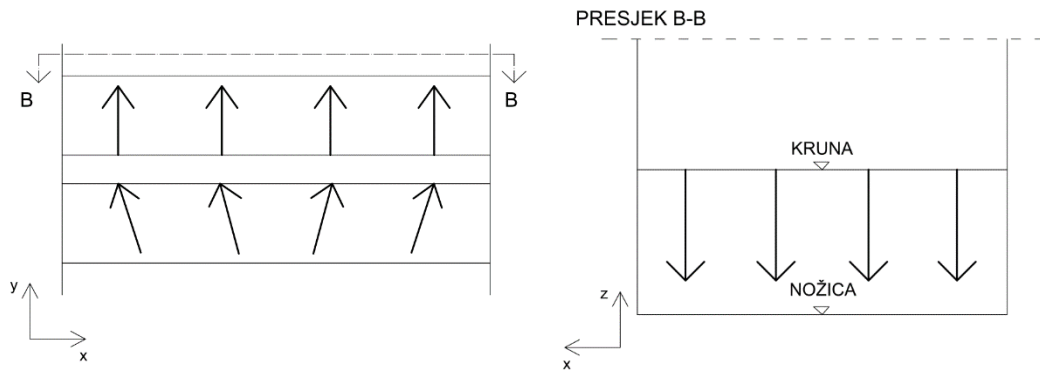
Iz drugog ispitivanja lučnog praga može se zaključiti da zbog samog geometrijskog oblika praga, voda koja prelijeva pod utjecajem sile gravitacije teži prema središtu zakrivljenosti praga. Iz navedenog slijedi kako se najveće brzine koncentriraju na sredini nizvodnog pokosa, i ovdje će se stvoriti „staza“ kojom će se najveći broj čestica pronositi s obzirom na činjenicu da sila raste s kvadratom brzine. Kako su kod ravnog poprečnog praga brzine ujednačene cijelom širinom praga, ova mana lučnog praga premostila se promjenom geometrije krune lučnog praga (slika 52 i 53).



Slika 52. Prelijevanje pri promijenjenoj geometriji krune lučnog praga (tlocrt, presjek)

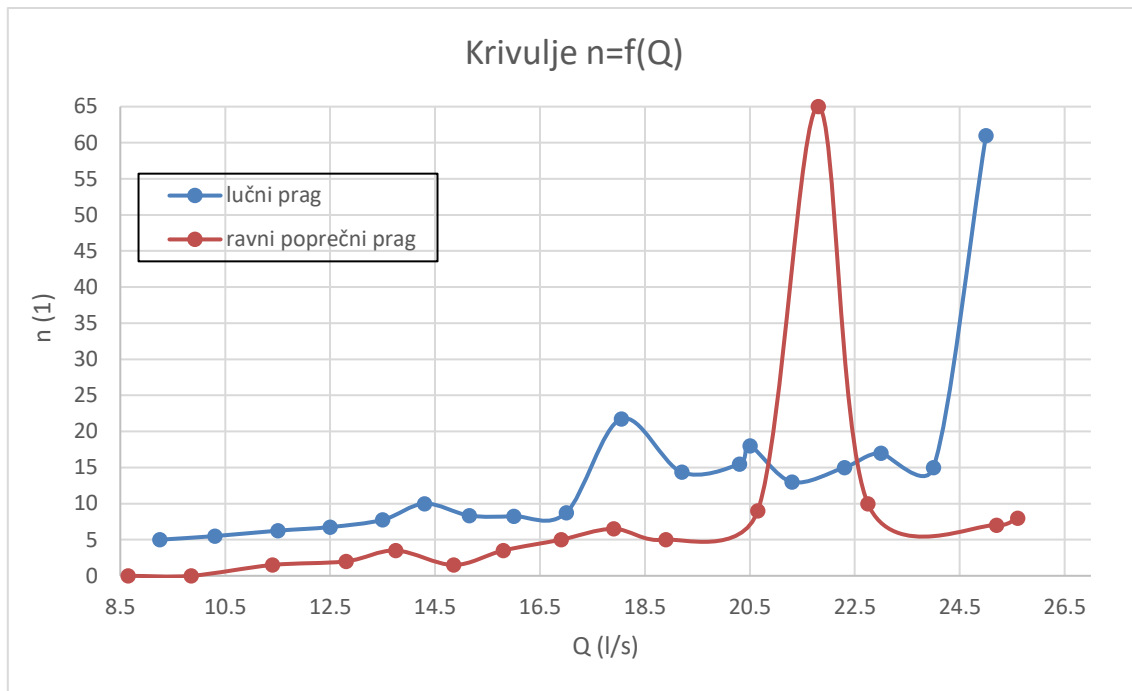
Snižavanjem krune od sredine prema obalama praga (slika 52.-presjek A-A), dobila se potpuno drugačija strujna slika. Mlazovi koji su se u prethodnim pokusima koncentrirali na sredini krune praga, sada se usmjeravaju prema bokovima. Nakon prelijevanja na nizvodnom pokosu se mlazovi pod utjecajem gravitacije i svojstva lučnog oblika navlače prema središtu luka. U tom procesu dolazi do kontakta mlaza s lijeve i desne obale gdje se međusobnim sudaranjem anulira njihova energija. Kod ravnog

poprečnog praga, mlaz vode prilikom prelijevanja nema ovakvu mogućnost disipacije energije jer se sva uzvodno akumulirana energija prelijeva jednoliko po cijeloj širini praga i troši prelazeći velik put niz slapšte, sve dok se tok ne umiri. Ovim rezultatom dobiva se na skraćenju slapišta, što znači velike novčane uštede prilikom izvođenja radova.



Slika 53. Prelijevanje preko ravnog poprečnog praga (tlocrt, presjek)

Uspoređujući mlaznice sa slike 52 (poboljšani lučni prag) i slike 53 (ravni poprečni prag), može se zaključiti da se lučnim pragom sa sniženim krilima voda odvlači sa obala prema središtu, gdje se radi sudaranja mlaznica opet pojavljuju manje brzine nego kod ravnog poprečnog praga. Kod ravnog poprečnog praga (slika 53), voda se jednoliko prelijeva preko cijele širine praga. Brzine su cijelom širinom ujednačene, odnosno obale nisu zaštićene od erozije kao kod lučnog praga. Kad bi u ovom slučaju spustili krunu praga od središta prema obalama, kao rezultat bi se pojavile još veće brzine uz obalu jer sama geometrija praga ne dopušta koncentraciju mlaza prema središtu. Ovime je dokazano kako lučnim pragom rješavamo problem urušavanja obala.



Slika 54. Ovisnost odnošenja čestica o promjeni protoka

Prema grafu pronosa čestica u funkciji povećanja protoka (slika 52), vidljivo je da ravni poprečni prag prije doživi nagli pronos materijala u odnosu na lučni prag. Ono što je ispitivanjem uočeno jest da kod ravnog poprečnog praga povećanjem protoka, broj ukupno odnesenih čestica biva manji u odnosu na lučni, ali zato pri nekom određenom protoku nastupa nagli lom, što je uočljivo na grafu (slika 52). Lučni prag pri povećanju protoka samo lokalno odnosi čestice, dok se glavina konstrukcije i dalje drži čvrsto uklještena. Ovime je dokazano da se lučnim pragom osim što se nizvodno ostvaruju manje brzine (kraće slapište – uštede u izgradnji) i štite obale od erozije, također dobiva postojanija struktura. Do loma konstrukcije će pod utjecajem uklještenja doći nakon dužeg vremena i pri većim protocima od ravnog poprečnog praga.

6. Zaključak

Nakon provedenog laboratorijskog istraživanja postalo je jasno da se početna hipoteza o prednostima lučnog oblika naspram ravnog poprečnog pokazala opravdanom. Lučni oblik uistinu ostvaruje bolje rezultate pri unaprijed definiranim uvjetima. Ti uvjeti su otkriveni opetovanim ponavljanjem pokusa, ali i kritičkim razmišljanjem u određenim situacijama.

Ovim ispitivanjem dokazalo se da osim samog oblika geometrije praga postoji još nekoliko ključnih faktora koji doprinose (ne)stabilnosti. Prije svega je to pravilan raspored granulata na nizvodnom pokosu koji mora biti čvrsto zbijen kako ne bi već pri manjem protoku došlo do odnošenja čestica. Ne treba izlaziti iz okvira proračunatih dimenzija kamena, već postojeći preraspodijeliti na način da se na sredinu nizvodnog pokosa koncentrira veći granulati, a kompenzacija izvrši na bokovima gdje se postavlja manji granulati. Tek u slučaju potpune zbijenosti i odgovarajućeg rasporeda čestica, uklještenost, koja je dominantna kod lučnog oblika, dolazi do izražaja i do maksimalne iskoristivosti, a samim time i do veće otpornosti konstrukcije.

Ono što se zasigurno pokazalo kao trenutak kreativnosti bila je odluka da se kota obala spusti u odnosu na kotu krune praga. U preporučenoj literaturi može se naći upravo obrnuti slučaj gdje se namjerno snižava kota krune praga, a time kote obala ostaju iznad. Postavlja se pitanje ima li to ikakvog hidrauličkog uporišta i zašto je uvriježeno suprotno stajalište. Problem je što ova tema nije dovoljno izučena niti je poznato da ima sličnih analiza, no temeljem provedenih ispitivanja u dostupnim uvjetima, odgovor je da svakako ima hidrauličko uporište. Dokazalo se da u slučaju pravilnog rasporeda čestica pri sniženoj koti krune lučnog praga naspram kota obala, dolazi do brže degradacije nizvodnog pokosa i erozije te konačno do sloma nego kada su obale bile snižene. Ta spoznaja bila je temelj trećem ispitivanju lučnog praga (L-3) gdje se uz maksimalnu zbijenost, odgovarajuću postavu granulata te snižavanjem kota obala došlo do najboljih rezultata i time dokazalo da je takva izvedba unutar ograničenih i jednakih uvjeta za oba slučaja, povoljnija.

U radu se spominje i problem erodiranja obala uslijed djelovanja vode, no i ovakvim izvođenjem, što možda i nije intuitivno sasvim jasno, voda koja se preusmjerava na bokove i time rasterećuje sredinu i dalje ostvaruje manje brzine nego kod ravnog

poprečnog praga što znači da ne predstavlja ugrozu za obale i time svakako dokazuje opravdanost ovakve izvedbe.

Bitno je istaknuti da je pri izvođenju trećeg pokusa ravnog poprečnog praga (R-3) namjerno korišten predimenzionirani granulat s namjerom rušenja osnovne premise, a dobivenim sličnim rezultatima s lučnim pragom uz korištenje granulata iz ograničene, proračunate frakcije, ona pada u vodu i time dokazuje da se uz ispunjenje ključnih faktora lučni prag pokazao boljim.

Za sljedeći korak predlaže se nastavak ispitivanja s većim modelom odnosno manjim mjerilom, kao i korištenje tucanika umjesto šljunka što je primjerenije za izgradnju pragova. Ovim promjenama će se smanjiti inicijalna greška i postići uvjeti vrlo slični stvarnima te će utjecaj ključnih navedenih faktora maksimalno doći do izražaja.

7. Zahvale

Zahvaljujemo mentoru prof. dr. sc. Goranu Gjetvaju na pomoći, susretljivosti i trudu uloženom u usmjeravanju razmišljanja za ostvarenje zadanog cilja. Velika hvala laborantu Franji Živkoviću koji je bio sveprisutan za vrijeme izvođenja laboratorijskog ispitivanja i koji nas je obogatio iskusnim savjetima. Također se zahvaljujemo Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na ustupanju hidrotehničkog laboratorija i pripadne opreme bez kojih ovaj rad ne bi bio moguć. Na kraju, hvala svima koji su nam davali savjete, ali i kritike koje su u konstruktivnom pogledu temelj sazrijevanja i usavršavanja kako pojedinca, tako i šire zajednice.

8. Popis slika

<i>Slika 1. Tlocrtni, shematski prikaz ravnog poprečnog i lučnog praga</i>	<i>2</i>
<i>Slika 2. Poprečni presjek praga s prikazanim konstruktivnim elementima</i>	<i>3</i>
<i>Slika 3. Dijagram specifične energije poprečnog presjeka korita, ovisan o dubini, pri konstantnom specifičnom protoku</i>	<i>6</i>
<i>Slika 4. Prikaz energetske linije i linije vodnog lica prilikom prelijevanja preko praga. 7</i>	<i>7</i>
<i>Slika 5. Osnovni dijelovi luka</i>	<i>9</i>
<i>Slika 6. Usporedba geometrije u poprečnom presjeku</i>	<i>10</i>
<i>Slika 7. Momentni dijagram grede</i>	<i>11</i>
<i>Slika 8. Momentni dijagram luka</i>	<i>11</i>
<i>Slika 9. Dijagram poprečnih sila grede</i>	<i>12</i>
<i>Slika 10. Dijagram poprečnih sila luka</i>	<i>12</i>
<i>Slika 11. Statika polukružnog luka</i>	<i>13</i>
<i>Slika 12. Zglobovi i tlačna linija u ekstremnim slučajevim</i>	<i>14</i>
<i>Slika 13. Vrijednosti koeficijenta otpora C_D za različite oblike</i>	<i>15</i>
<i>Slika 14. Trodimenzionalni prikaz praga</i>	<i>16</i>
<i>Slika 15. Prikaz rasporeda čestica u poprečnom presjeku praga</i>	<i>17</i>
<i>Slika 16. Prikaz svih sila koje djeluju u xy-ravnini</i>	<i>18</i>
<i>Slika 17. Prikaz krune ravnog poprečnog praga gledajući odozgo</i>	<i>18</i>
<i>Slika 18. Prikaz krune lučnog praga gledajući odozgo</i>	<i>19</i>
<i>Slika 19. Prikaz uklještenosti čestica pomoću kuglice sladoleda u kornetu</i>	<i>20</i>
<i>Slika 20. Prikaz normalne komponente sile koja ima ulogu oslonca</i>	<i>21</i>
<i>Slika 21. Prikaz najkritičnije čestice u poprečnom presjeku praga</i>	<i>21</i>
<i>Slika 22. Tlocrtni prikaz najkritičnijeg presjeka</i>	<i>22</i>
<i>Slika 23. Prikaz svih sila koje djeluju u yz-ravnini</i>	<i>23</i>
<i>Slika 24. Prikaz oslanjanja promatrane čestice na česticu ispod suprotstavljajući se rezultanti svih nepovoljnih djelovanja</i>	<i>24</i>
<i>Slika 25. Trodimenzionalni prikaz lučnog praga s dominantnim djelovanjima</i>	<i>25</i>
<i>Slika 26. Slijeganje tla</i>	<i>27</i>
<i>Slika 27. Laminarno strujanje</i>	<i>28</i>
<i>Slika 28. Raspodjela tlakova kod opstrujavanja realnog fluida oko čestice</i>	<i>28</i>
<i>Slika 29. Stvaranje vrtloga suprotnog smjera</i>	<i>29</i>

<i>Slika 30. Turbulentno strujanje</i>	29
<i>Slika 31. Poprečni prag u pokusnom kanalu.....</i>	30
<i>Slika 32. Elektromagnetni mjerač protoka</i>	33
<i>Slika 33. Srednja vrijednost hidrograma</i>	34
<i>Slika 34. Srednja vrijednost uzvodne i nizvodne dubine.....</i>	35
<i>Slika 35. Mjerenje brzina pomoću hidrometrijskog krila</i>	35
<i>Slika 36. Hidrometrijsko krilo [19]</i>	36
<i>Slika 37. Podvodni prikaz propelera hidrometrijskog krila kojim mjerimo brzine.....</i>	37
<i>Slika 38. Ravni poprečni prag.....</i>	38
<i>Slika 39. Ovisnost promjene brzina o povećanju protoka za pokus R-2</i>	40
<i>Slika 40. Ovisnost odnošenja čestica o promjeni protoka za pokus R-2.....</i>	41
<i>Slika 41. Ovisnost promjene brzina o povećanju protoka za pokus R-3.....</i>	42
<i>Slika 42. Ovisnost odnošenja čestica o promjeni protoka za pokus R-3.....</i>	43
<i>Slika 43. Poprečni prikaz sloma ravnog poprečnog praga i odnošenje krune.....</i>	44
<i>Slika 44. Tlocrtni prikaz sloma ravnog poprečnog praga i odnošenje krune.....</i>	44
<i>Slika 45. Lučni prag</i>	45
<i>Slika 46. Rušenje lučnog praga</i>	46
<i>Slika 47. Ovisnost promjene brzina o povećanju protoka za pokus L-2.....</i>	48
<i>Slika 48. Ovisnost odnošenja čestica o promjeni protoka za pokus L-2</i>	48
<i>Slika 49. Ovisnost promjene brzina o povećanju protoka za pokus L-3.....</i>	51
<i>Slika 50. Ovisnost odnošenja čestica o promjeni protoka za pokus L-3</i>	52
<i>Slika 51. Ovisnost povećanja protoka na crpki i brzina na ulazu u slapište u sredini korita za ravni poprečni i lučni prag</i>	53
<i>Slika 52. Preljevanje pri promijenjenoj geometriji krune lučnog praga (tlocrt, presjek)</i>	54
<i>Slika 53. Preljevanje preko ravnog poprečnog praga (tlocrt, presjek)</i>	55
<i>Slika 54. Ovisnost odnošenja čestica o promjeni protoka.....</i>	56

9. Popis tablica

Tablica 1. Kontrola modela prema teoriji sličnosti.....	32
Tablica 2. Rezultati drugog pokusa za ravni prag.....	39
Tablica 3. Rezultati trećeg pokusa za ravni prag	42
Tablica 4. Rezultati drugog pokusa za lučni prag	47
Tablica 5. Rezultati trećeg pokusa za lučni prag	50

10. Popis literature

[1] Kuspilić, N. (2009), *Skripta iz predmeta Regulacije vodotoka*, Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

[2] Breusers, H.N.C. (1982), *Lecture notes on sediment transport*, Delft, Waterloopkundig Laboratorium

[3] Sokol, I. (2016), *Otpornost riječnih pragova na hidrauličku eroziju*, Zagreb, Diplomski rad na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu

[4] Dostupno: < http://www.voda.hr/sites/default/files/dokumenti/prilog_a-regulacijske_gra-evina.pdf >

Posjećeno: [21.4.2017.]

[5] Lončar, G. i Andročec, V. (nd), *Skripta iz predmeta Mehika tekućina*, Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

[6] Dostupno: < <https://www.architectural-review.com/rethink/the-history-of-architecture-in-eleven-arches/8673174.article> >

Posjećeno: [31.3.2017.]

[7] Bleiziffer, J. (2017), *Skripta iz predmeta Konstrukcije*, Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

[8] Radić, J. (2007.), *Masivni mostovi*, Zagreb, Hrvatska sveučilišna naklada

[9] Radić, J. (nd), *Prezentacija iz predmeta Mostovi*, Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

[10] Perko, S. (2012.), *Teorije lukova*, Zagreb, Završni rad na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu

[11] Gjetvaj, G. i Lončar G. (nd), *Praktikum 15. iz predmeta Hidraulika 1*, Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

[12] Ocvirk, E. i Kuspilić, N. (2016), *Skripta iz predmeta Hidrotehničke građevine*, Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

- [13] Schlichting, H. (1979), *Boundary-layer theory*, New York, McGraw-Hill
- [14] Vuković, Ž. (1994), *Osnove hidrotehnike*, Zagreb, Akvamarine
- [15] Zenzerović, I. (2010), *Određivanje mehaničke impedancije prigušivača vibracija tipa Stockbridge*, Zagreb, Završni rad na Fakultetu strojarstva i brodogradnje fakultetu Sveučilišta u Zagrebu
- [16] Jerbić, B., Semenski, D. i Bakić, A. (2005), *Analiza statičke čvrstoće i stabilnosti stupa CRS 300*, Zagreb, Elaborat IGH
- [17] Gjetvaj, G. (nd), *MehTek 11 - vjetar*, Zagreb, Presentacije namijenjene predavanju iz predmeta *Mehanika tekućina* na građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu
- [18] Dostupno:
<http://www.hidroing.biz/oprema_za_izvodjenje_hidroloskih_radova.html>
- Posjećeno: [19.4.2017.]

11. Sažetak

Antonija Cikojević, Filip Ferenčak i Josip Husajina

POBOLJŠANJE KARAKTERISTIKA RIJEČNOG PRAGA MODIFIKACIJOM LUČNOG OBLIKA

Riječni pragovi su poprečne regulacijske građevine čija je osnovna funkcija stabilizacija uzdužnog profila korita. Ovim građevinama se smanjuje degradacija dna korita i optimizira vodni režim površinskih i podzemnih voda. Postoje razna rješenja u projektiranju i u izvedbi pragova ovisno o erozijskim i morfološkim uvjetima. Glavni problemi s kojima se pragovi u prirodi suočavaju su oštećenje nizvodne nožice uslijed generiranja ubrzanog tečenja te lokalna nestabilnost u dodirnim točkama praga i obala uzrokovana erozijom materijala od kojega je obala izgrađena.

Kako prema postojećoj literaturi nema naglašenog kriterija odabira oblika praga za pojedine praktične situacije, cilj ovoga rada je izraditi laboratorijski model ravnog poprečnog i lučnog praga te ispitati otpornost navedenih oblika za uvjete opterećenja u kojima će se konstrukcija naći tijekom uporabnog vijeka. Modifikacijom oblika praga će se pokušati, za praktične primjene, povećati otpornost konstrukcije i stabilizirati obale u uporišnim točkama građevine u odnosu na postojeća rješenja.

Osnovna premisa je da će se lučni prag po više kriterija pokazati kao povoljniji izbor. Prvenstveno se misli na izdržljivost konstrukcije oblika luka čiji će se slom dogoditi pri većim protocima nego kod ravnog poprečnog praga. Teoretskim dijelom rada pojašnjeni su režimi tečenja vode preko praga te se daje uvid o silama koje djeluju na pojedinu česticu tijela konstrukcije. Navedene su teze o doprinosu uklještenja susjednih čestica na stabilnost lučnog praga, a također je pojašnjena i mogućnost pojave mehanizma urušavanja praga. Fizikalnim modelom provedena su po tri ispitivanja za lučni i ravni poprečni prag te su dobiveni rezultati tablično i grafički obrađeni. Ovim se radom doprinos uklještenja čestica, kao posljedica tlocrtne promjene oblika, nije pokazao kao temeljni faktor ojačanja praga, već je poprečno oblikovanje krune lučnog praga – spuštanjem blizu obala, značajnije utjecalo na stabilizaciju režima strujanja. Ovakvom modifikacijom geometrije lučnog praga

postignuti su bolji rezultati u vidu povećanja otpornosti praga, pravilnije raspodjele brzina, stabilizacije obala te u konačnici ekonomičnosti izgradnje.

Ključne riječi: lučni prag, ravni poprečni prag, stabilizacija obala, uklještenje lučnog praga, modificirani lučni oblik

12. Summary

Antonija Cikojević, Filip Ferenčak i Josip Husajina

IMPROVEMENT OF THE CHARACTERISTICS OF THE RIVER THRESHOLD BY MODIFYING THE ARCHED SHAPE

The river thresholds are transverse regulation constructions whose main function is stabilization of the longitudinal profile of the riverbed. These constructions are used to reduce degradation of the riverbed bottom and to optimize the water regime of surface and underground waters. There are various solutions in designing and execution of the thresholds, depending on erosion and morphological factors. The main problems which the thresholds in the nature are facing are damage of the downstream foot due to the accelerated flow generation and local instability at the touchpoints of the river thresholds and the coasts caused by erosion of the material from which coasts are built.

Since the existing literature doesn't stress the criteria for choosing the threshold shape for individual practical situations, the aim of this paper is to construct a laboratory model of the straight transverse and arched threshold, and to examine the resistance of these forms for load conditions which a construction may encounter during the lifetime of use. For practical purposes, the resistance of the construction will be increased and the coasts will be stabilized in foothold points by modifying the shape of the threshold, in relation to the existing solutions.

The basic premise is that the arched threshold will turn out to be a more favourable choice, according to many criteria. Firstly, it is about the durability of the arch-shaped construction which would break at greater flow rates than a straight transverse threshold would. In the theoretical part of the paper, the flow regimes over the thresholds are explained and insight about forces which act on a single particle of the construction body is provided. The theses are provided which explain how adhesion of the adjacent particles contributes to the stability of the arched threshold. The paper also explains the possibility of the emergence of the threshold collapse mechanism. Using the physical model, three trials for the arched threshold and three trials for the

transverse threshold were conducted, and given results were processed in tables and graphically. This paper showed that the contribution of the particle adhesion (as the result of the layout shape change) did not prove to be a fundamental factor of the threshold reinforcement, but the transverse shape of the arched threshold crown significantly affected the stabilization of the flow regime, by lowering near the coasts. By this modification of the arched threshold geometry, better results were achieved in terms of increasing the resistance of the threshold, better speed distribution and, finally, profitability of the construction.

Key words: arched threshold, transverse threshold, stabilization of the coasts, particle adhesion, modification of the arched threshold