



PODROČJE

FIZIKA

Raziskovalna naloga:

REČNI PRETOK IN POPLAVE



AVTORJI: Tiana Demirović, Maj Žižmond, Eva Kenda, 9. razred

Mentorja: Milan Ambrožič in Mojca Milone

Šola: OŠ Solkan



Šol. leto: 2023/24

POVZETEK

Poleti 2023 smo se soočili z uničujočimi poplavami v Sloveniji. Poplave nastanejo zaradi dolgotrajnih in obilnih padavin, ki močno povečajo pretok lokalnih rek. Reka zaradi dviga višine prestopi bregove ustaljene struge in se razlije v okolico. Zato menimo, da je pri problemu poplav najbolj ključna zveza med prostorninskim pretokom reke in njeno višino v strugi. Obe količini pa sta povezani tudi s širino struge in njeno obliko. Zato smo se odločili, da na osnovi osnovnošolskega znanja fizike sistematično in kvantitativno raziščemo zvezo med omenjenimi parametri reke. Pri šolskih poskusih smo uporabili žlebove treh različnih oblik. Z iztekanjem vode skozi luknjico v zgornji posodi smo kontrolirali pretok vode, ki je tekla po nagnjenem žlebu v spodnjo posodo. Pri danem nagibu žleba smo merili pretok, višino vode v žlebu in hitrost. Ugotovili smo pričakovano kvalitativno in delno tudi kvantitativno zvezo med temi količinami.

ZAHVALA

Zahvaljujemo se mentorjema dr. doc. fizike Milanu Ambrožiču in učiteljici tehnike in fizike Mojci Milone za spodbudo in pomoč, ter vodstvu šole za nudenje prostora in potrebnih pripomočkov.

Kazalo vsebine

NASLOVNICA-

FIZIKA in TEHNIKA.....	1
POVZETEK.....	3
1 UVOD.....	4
2 TEORETIČNI DEL	5
3 EKSPERIMENTALNI DEL.....	9
4 SKLEP	20
5 MATEMATIČNI DODATEK.....	21
VIRI	21

1 UVOD

Najprej smo iskali informacije iz spletnih, pisnih in človeških virov, da bi se boljše seznanili z vzroki za poplave. Omenimo poplave v večjem delu Slovenije poleti 2023 [1]. Večje poplave se v Sloveniji pojavijo v povprečju vsakih nekaj let, čeprav z neenakomernimi časovnimi razmiki, najpogosteje na območju Save in Drave. Poplavijo pa lahko tudi manjše reke, na primer, Vipava na Primorskem. Pri pouku fizike smo se sicer že seznanili z nekaj pojavi v mirujoči vodi, kot sta hidrostatični tlak in vzgon. Obravnava nekaterih lastnosti tekočih vod, ki nas tu zanimajo, pa ne spada v osnovnošolsko fiziko. Vseeno lahko z določenim usvojenim znanjem iz fizike in matematike posežemo tudi na to področje. Na primer, definicija za prostorninski ali masni pretok tekoče vode je dokaj enostavna. Podobno je s hitrostjo delov tekoče vode: hitrost na sredini gladine tekoče vode lahko izmerimo s spuščanjem majhnih koščkov plavajočega materiala po njej.

Na splošno je obravnava gibanja tekočin ali hidrodinamika izjemno zapletena fizikalna veja celo za visokošolski nivo, ker zahteva razumevanje in reševanje ustreznih enačb veliko matematičnega znanja. Vseeno pa se da z dovolj preprostimi šolskimi poskusi najti nekatere zveze med količinami in jih predstaviti tudi v obliki tabel ali grafov, če je meritev dovolj in

so tudi dovolj zanesljive. Od tod lahko pridemo vsaj do kvalitativnega razumevanja, kaj se dogaja, ko se pretok vode povečuje. Poskuse v učilnici lahko potem vsaj približno povečamo z naravnimi tekočimi vodami, predvsem potoki in rekami s preprosto strugo, brez razvejitev.

V učilnici bomo preučevali stacionarni tok, pri katerem se lastnosti ne spreminjajo s časom, ali pa se spreminjajo tako počasi, da lahko za kratek čas privzamemo, kot da se ne spreminjajo. S tem bomo simulirali tekoče vode, npr. reke in potoke, v navadnih razmerah. Če pa je tok reke izrazito nestacionaren in se pretok zaradi padavin hitro povečuje, se na kritičnih mestih vzdolž reke gladina tako zviša, da prestopi bregove in nastanejo poplave. To se v Sloveniji dogaja pogosto. Zato bomo skušali razložiti zvezo med lastnostmi toka, podanimi s fizikalnimi količinami, ter pojavom poplav.

Ukvarjali smo se s tremi raziskovalnimi vprašanji:

- **Ali oblika, nagib in dolžina struge sploh kaj vpliva na prostorninski pretok vode (na kratko pretok), če je izvir stabilen?**
- **Kako lastnosti izvira vplivajo na pretok?**
- **Kako so med seboj povezani pretok, višina vode in hitrost na gladini?**

Našo raziskavo so usmerjale tri hipoteze kot odgovori na zastavljena raziskovalna vprašanja:

1. **Pretok je odvisen samo od izdatnosti izvira, ne pa od lastnosti struge, pri pogoju, da se razmere ne spreminjajo s časom.**
2. **Če je izvir stoječa voda z odprtino za iztekanje vode, je njegov pretok večji, če je odprtina večja in če je nivo vode nad odprtino višji.**
3. **Z večanjem pretoka se povečujeta tudi višina vode in hitrost delov vode, npr. na sredini gladine (na kratko hitrost), če se drugi parametri (nagib, dolžina in oblika struge) ne spreminjajo.**

2 TEORETIČNI DEL

Prostorninski pretok (na kratko pretok) je ena od osnovnih značilnosti rek in drugih tekočih voda [2]. To je fizikalna količina, ki jo definiramo kot količnik med pretočeno prostornino V in časom t :

$$\phi = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Navadno se pretok označuje kot ϕ_v , s čimer poudarimo, da gre za prostorninski pretok (in ne morda za masni pretok ϕ_m). Mi pa oznako poenostavimo v ϕ . Ustrezna fizikalna enota za pretok je m^3/s , za manjše pretoke pa lahko uporabimo tudi druge enote. Za prostornino lahko uporabimo tudi votlo enoto, npr. liter ali mililiter. Zato lahko za majhne pretoke, npr. pri šolskih poskusih, uporabimo tudi enote, kot je ml/s (mililiter na sekundo).

Definicija pretoka po enačbi (1) točno velja, ko je tok **stacionaren**. Stacionarnost pomeni, da se razmere in fizikalne lastnosti, tudi sam pretok, ne spreminjajo s časom [2]. Če pa se razmere vseeno postopno spreminjajo s časom (nestacionarni tok), a dovolj počasi, lahko še vedno obdržimo enačbo (1). Vendar mora biti čas merjenja dovolj kratek, tako da se razmere v tem času skoraj nič ne spremenijo. Potem lahko rečemo, da se pretok sicer spreminja s časom, če ga primerjamo v daljših časovnih razmikih, a je vsakič časom ene meritve dovolj kratek. Poskuse v šoli bolje kontroliramo in lažje razumemo, če med meritvijo ves čas vzdržujemo stacionarni tok. Vendar to niti ni tako enostavno. Natančnejši potek poskusov bomo opisali v naslednjem razdelku.

Pretok tekoče vode merimo na izbranem mestu vzdolž struge, zajeti pa moramo celotni prečni prerez struge in vode v njej. Pri stacionarnem toku je pretok tudi povsod vzdolž struge enak. Drugače bi se voda nekje nabirala, drugje pa upadala, to pa na bi bil več stacionarni tok. To pomeni: če merimo pretok v zgornjem delu struge, mora biti enak kot v spodnjem delu. Pri reki ne moremo kar zajeti vse vode na določenem mestu struge. V tem primeru se pretok izmeri/izračuna posredno: merimo globinski profil vode in njeno hitrost na različnih mestih, iz te množice podatkov pa izračunamo pretok. Lažje je delo npr. pri majhnem studencu, če lahko vso vodo zajamemo v posodo.

Enakost pretoka po vsej strugi stacionarnega toka velja tudi, če se oblika ali dimenzije struge spreminjajo vzdolž toka. Na primer, nekje je struga širša, drugje pa ožja. Zato pa se morajo v tem primeru spremeniti drugi parametri, da ostane pretok enak: višina in hitrost vode. Da lažje razumemo zvezo med pretokom in lastnostmi struge, vzemimo najpreprostejši primer, ko teče voda po strugi s pravokotnim prerezom s širino a in višino ali globino vode h . Naj bo tudi hitrost povsod enaka v . Tedaj velja enostavna enačba:

$$\phi = ahv \quad (2)$$

To enačbo lahko izpeljemo tako, da v času t vzamemo pretočeno prostornino kvadra z robovi a , h in s : $V = ahs$. Pri tem je tretji rob kar pot pri enakomernem gibanju delov reke: $s = vt$. Iz enačbe (1) potem takoj dobimo enačbo (2), ko krajšamo čas.

V pravilnost enot v enačbi (2) se lahko prepričamo tudi s kratkim računom. Vzemimo naslednje podatke za širino pravokotne struge, globino in povprečno hitrost gibanja vode: $a = 5 \text{ cm}$, $h = 4 \text{ mm}$, $v = 1 \text{ m/s}$. Tedaj je pretok:

$$\phi = 5 \text{ cm} \cdot 0,4 \text{ cm} \cdot 100 \text{ cm/s} = 200 \text{ cm}^3/\text{s} = 200 \text{ ml/s}$$

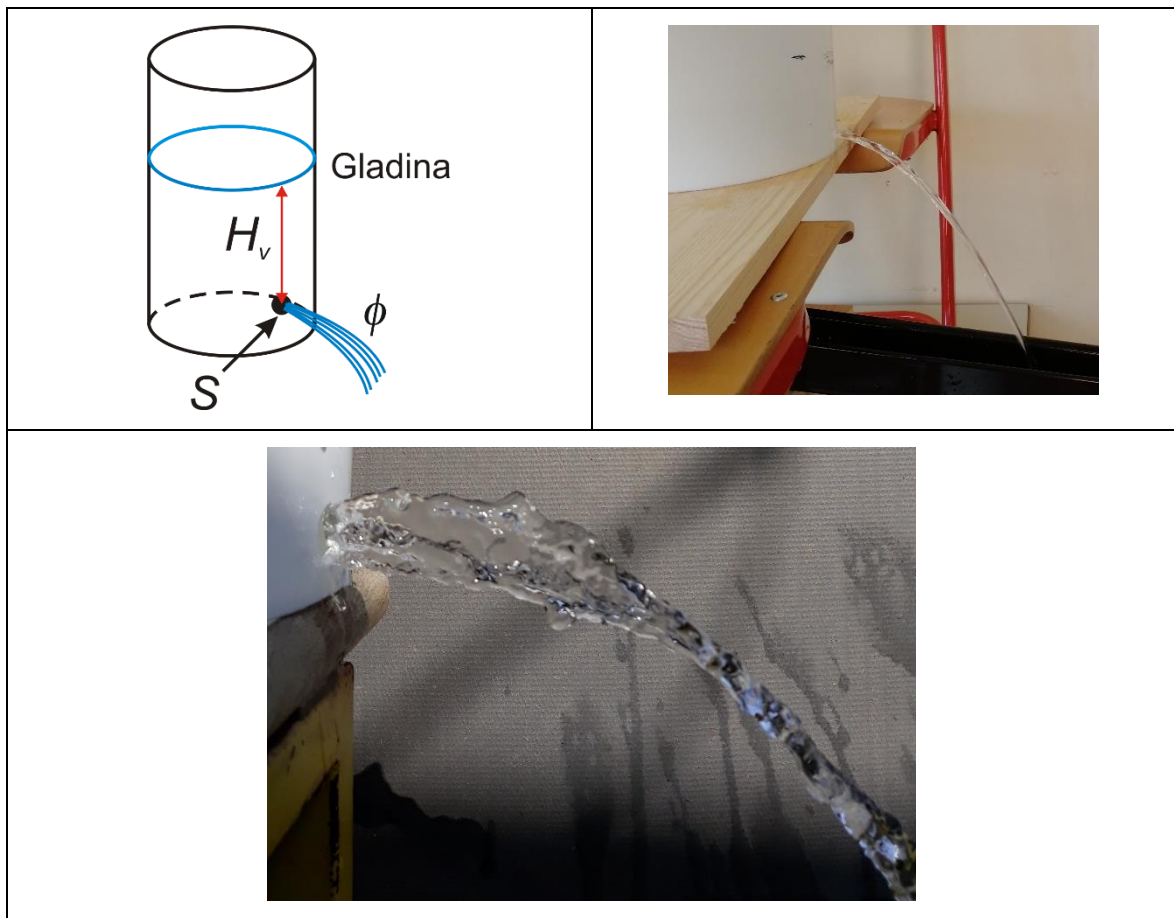
Kubični centimeter je namreč enak mililitru, zato velja enakost $\text{cm}^3/\text{s} = \text{ml/s}$.

Ker je pretok odvisen od izvira, napišimo enačbo, kako je pretok curka tekočine skozi luknjico v posodi odvisen od višine nivoja tekočine nad luknjico (slika 1):

$$\phi = \sqrt{2gH_v} \cdot \alpha S \quad (3)$$

Pri tem je $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ težni pospešek, H_v višinska razlika med gladino vode in majhno luknjico, S ploščina luknjice, α pa je koeficient, manjši od 1. Ta koeficient pove, da je ploščina curka manjša od ploščine luknjice, skozi katero izteka. Curek tekočine se namreč takoj po prehodu iz luknjice zoži [4]. Enačbe (3) ne bomo izpeljali, ker je za višji nivo fizike [2, 3]. Vseeno pa jo bomo eksperimentalno preverili. Glede teorije omenimo le, da je enačba

povezana z ohranitvijo mehanske energije pri pretakanju tekočine. To v tem primeru kar dobro velja, čeprav se lahko pri pretakanju tekočin del mehanske energije pretvarja v notranjo. Vendar v prvem, korenskem faktorju, prepoznamo hitrost pri prostem padu z višine H_v : $v = \sqrt{2gH_v}$. To hitrost dobimo iz enačbe za pretvorbo potencialne energije v kinetično: $mgH_v = \frac{1}{2}mv^2$, ko krajšamo maso. Pri tekočini v posodi sicer ne gre za prosti pad, ampak si mislimo, da zgornje plasti tekočine pritiskajo na spodnje, tako da tekočina izteka iz luknjice zaradi hidrostaticnega tlaka. Za koeficient α je eksperimentalna ocena $\alpha \approx 0,6$. Enačba (3) je za našo raziskavo zelo koristna, ker bo naš izvir prav kangla z izvrtano okroglo luknjico, v katero bomo nalili vodo.



Slika 1: Iztekanje tekočine iz posode z luknjico

Slika 1 prikazuje tudi dve fotografiji, s katerima smo skušali ugotoviti, ali se curek vode res zoži, ko zapusti luknjico v posodi. Pri sliki zgoraj desno opazimo samo postopno oženje curka, vendar je to posledica težnosti. Čim nižja je lega vode v curku, tem hitrejša je voda zaradi prostega pada, zato je prerez curka manjši, saj ostaja pretok vode enak. Slika spodaj pa nam razkriva nekaj več podrobnosti in tudi nepravilnosti v curku, saj smo naredili fotografijo bližje curku. Malo dlje od posode vidimo zožitev, ki verjetno ni samo posledica težnosti, ampak tudi razmer v posodi tik ob luknjici, saj se bolj desno curek spet razširi. Res

pa sta na teh dveh fotografijah luknjici različno veliki in tudi nivo gladine vode je drugačen. Za primerjavo smo opazovali tudi obliko curka vode, ki teče iz pipe navpično navzdol: v tem primeru se curek zares postopno oži, čim nižje ga gledamo. To nam daje potrditev, da je dodatni koeficient α v enačbi (3) umesten.

V teoriji razlikujemo dva zelo različna režima stacionarnega toka: **laminarnega** in **turbulentnega** [2]. Opišimo razliko med njima na enostaven način. Pri laminarnem toku se gibljejo plasti tekočine druga ob drugi, kot so počesani lasje. Turbulentni tok pa bolj spominja na kuštrave lase. Fizikalni vzrok za razliko med obema vrstama toka pa je naslednji. Med plastmi tekočine, če se gibljejo različno hitro, pa tudi med spodnjo plastjo tekočine in dnom (v manjši meri tudi med tekočino in stranskima ploskvama), se pojavlja viskozno trenje. Ta vrsta trenja je značilna za vsako tekočino. Rečemo, da ima vsaka tekočina, tudi voda, viskoznost, ki je fizikalna količina, ki jo bomo omenili v nadaljevanju. Bolj viskozne tekočine, npr. med ali nafta v primerjavi z vodo, teže tečejo.

Od viskoznega trenja izhajajo razlike med laminarnim in turbulentnim tokom pri različnih hitrostih. Primerjajmo reko in zelo počasen zemeljski plaz (ki si ga lahko mislimo kot tekočino). Oba poganja po klancu navzdol sila teže. Dokler je hitrost majhna, viskozno trenje učinkovito upočasnjuje gibanje. Tekočina (plaz v naši primerjavi) tik ob dnu miruje (se lepi ob dno), čim višje pa so plasti, tem hitreje tečejo. Zato tudi spodnje plasti reke upočasnjujejo zgornje plasti. Plaz teče v laminarnem režimu. Njegova hitrost na površju je največja, vendar pa je povprečna hitrost po celem prerezu manjša od površinske hitrosti. Teorija pokaže, da je povprečna hitrost v idealnem laminarnem režimu enaka $2/3$ največje hitrosti.

Ko pa je hitrost dovolj velika, se tudi spodnje plasti odlepijo od dna in viskozno trenje praktično ne zavira več toka. To je delno odvisno tudi od nepravilnosti tal na dnu (kamni, izbokline, vbokline). Reka teče izrazito v turbulentnem režimu. Lahko privzamemo, da je njena hitrost po celem prerezu enaka, potencialna energija pa se pretvarja v kinetično. Vseeno se del energije pretvarja v notranjo zaradi vrtnčenja. Pri tem je notranja energija v bistvu kinetična energija drobnega gibanja, ki ga na veliki skali zanemarimo.

Laminarni in turbulentni tok se razlikujeta tudi po tem, kako sta največja hitrost toka in tudi globina vode v strugi odvisna od vseh parametrov: predvsem volumnskega pretoka in tudi nagiba struge. S tem se ne bomo ukvarjali, ker je teorija prezahtevna. Predpostavimo pa, da za naše šolske poskuse in še bolj za tekoče vode v naravi močno prevladuje turbulentni režim. Za grobo mejo med obema režimoma lahko po mnenju mentorja Ambrožiča vzamemo brezdimenzijske Reynoldsovo število:

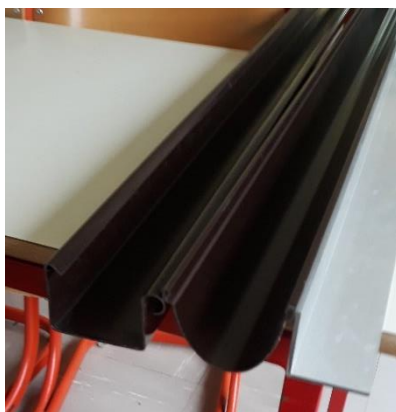
$$Re = \frac{\rho h v}{\eta} \quad (4)$$

V enačbi (4) za Reynoldsovo število Re sta poleg merjenih količin h (višina vode v strugi ali v žlebu pri šolskem poskusu) in v (značilna hitrost vode) še dve, ki podajata lastnosti vode: gostota $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$ in viskoznost $\eta \approx 1 \text{ mPa s}$ (milipaskal sekunda). Če je število Re zelo veliko, 1 000 ali več, dobro veljajo razmere za turbulentni režim toka, pri vrednosti 1 ali manj pa za laminarni režim. Vmesno področje je zelo široko in prehodno. Enačbo (4) sicer uporabljajo pri oceni meje med linearnim in kvadratnim zakonom upora pri gibanju telesa skozi tekočino [3].

Naredimo račun za pričakovane razmere v šolskem poskusu. Podatka naj bosta npr. $h = 1$ mm, $v = 1$ m/s. Enačba (4) nam da vrednost Reynoldsovega števila $Re = 1000$, tako da lahko zanesljivo govorimo o turbulentnem režimu. Pri rekah in potokih to še toliko bolj velja, ker so globine dosti večje. Zato lahko naredimo primerjavo med direktno izmerjenim pretokom po enačbi (1) in izračunanim po enačbi (2). Takšna primerjava nam da dodatni namig o zanesljivosti ali negotovosti meritev določenih količin.

3 EKSPERIMENTALNI DEL

Uporabili smo tri žlebove z različnimi oblikami prereza: pravokotnega, okroglega in trikotnega (slika 2). Pravokotni in okrogli žleb sta narejena iz plastične mase, trikotni pa iz aluminija. Njihove dolžine so: 200,5 cm za pravokotni žleb, 200,0 cm za okrogli žleb in 100,0 cm za trikotni žleb. Prečne dimenzije žlebov pa so naslednje. Pravokotni žleb ima notranjo širino 60 mm in višino 40 mm (ključna je za naše račune samo širina). Okrogli žleb nima prereza idealne oblike kroga, vendar za občutek vseeno privzamemo okrogli prerez. Žleb smo postavili pokončno na list papirja in s svinčnikom zarisali notranji krog. Pri tetivi 50 mm smo izmerili višino krožnega odseka 20 mm. Tako izračunamo polmer kroga 25,6 mm, račun pa je podan v dodatku. Ta podatek navajamo, ker menimo, da je višina vode v žlebu ali strugi v obliki krožnega odseka odvisna tako od pretoka kot od polmera kroga. Trikotni žleb ima prerez v obliki pravokotnega enakokrakega trikotnika z notranje kateto 47 mm, vendar to za račun ni ključni podatek.



Slika 2: Fotografija oblike žlebov

Račun prereza tekoče vode v okroglem žlebu je za osnovno šolo prezahteven, zato naredimo to samo za pravokotni in trikotni žleb. Če je višina vode v žlebu enaka h , potem izračunamo ploščino prereza tekoče vode za obe obliki žleba takole:

$$S = ah \quad \text{pravokotni žleb} \quad (5 \text{ a})$$

$$S = h^2 \quad \text{trikotni žleb} \quad (5 \text{ b})$$

Simboli v enačbah (5) pomenijo naslednje dolžinske količine: h = višina vode od najnižje točke žleba do njene gladine, a = širina pravokotnega žleba, S = ploščina prereza vode. Enačba (5 a) podaja torej ploščino pravokotnika s stranicama a in h , enačba (5 b) pa ploščino »obrnjenega« enakokrakega pravokotnega trikotnika s hipotenuzo $2h$ in višino h na to hipotenuzo (hipotenuzo podaja gladina vode). Ta ploščina je kar ploščina kvadrata s stranico h . Višino h merimo v pravokotni smeri glede na dno žleba.

V obeh primerih pa velja za pretok ista enačba: $\phi = Sv$, če je povsod po prerezu enaka hitrost. Ponovimo torej enačbi za pretok za oba primera:

$$\phi = ahv \quad \text{pravokotni žleb} \quad (6 \text{ a})$$

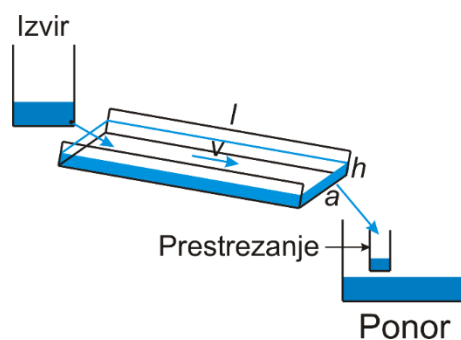
$$\phi = h^2 v \quad \text{trikotni žleb} \quad (6 \text{ b})$$

Poskuse smo izvedli na naslednji način. Najprej smo naredili nekaj približnih meritev. Uporabili smo vse tri žlebove, jih nagnili z nekaj različnimi nagibi, tako da smo jih dobro držali v rokah. Zgornji konec vsakega žleba smo postavili pod pipo, spodnjega pa nad škaf. Zajemali smo vodo, ki je tekla s spodnjega konca, v menzuro, pri tem pa odmerili čas 10 sekund. Vodovodno pipo smo odprli na tri različne stopnje pretoka in pri vsakem smo postavili vse tri žlebove. Ugotovili smo, da je pretok vode, ki smo ga merili z menzuro, res v približnem poskusu neodvisen od oblike žleba. Računali smo na to, da v kratkem času zaradi morebitnih nihanj tlaka v vodovodnem omrežju pretok vode iz pipe pri določenem zasuku ventila ne niha bistveno. S tem smo kvalitativno potrdili prvo hipotezo.

Natančnejše meritve pa smo naredili drugače, in sicer zaradi varčevanja vode in zaradi kontrole pretoka izvira vode. Shema poskusa je prikazana na sliki 3. Najboljše je, če je »izvir« dovolj velika posoda, da se med iztekanjem vode iz luknjice zelo počasi niža nivo vode v posodi. Pomagamo si tudi s počasnim dolivanjem vode v to posodo. S flomastrom smo na posodi (plastična kangla v naših poskusih) označili nivoje 5 cm, 10 cm, 15 cm in 20 cm nad luknjico. Tako zagotovimo konstanten pretok vode na žleb za dano meritev. Višina nivoja vode v posodi namreč določa hitrost iztekanja vode iz luknjice, gl. enačbo (3). Da štedimo vodo, jo dolivamo nazaj iz spodnje posode – »ponora«. Zadostuje merjenja pretoka le v ponoru. Stacionarne razmere za vodo v žlebu hitro dosežemo, ko malo počakamo (nekaj sekund). To vidimo že z opazovanjem toka po žlebu. Lahko pa bi stacionarnost toka preverili še na več merskih načinov:

- da se globina vode v žlebu ne spreminja več (konstantna globina);
- da testni koščki lesa, ki jih zaporedoma spustimo po vodi v žlebu, vsi potrebujejo enak čas za pot (konstantna hitrost);
- da nivo vode v merilni menzuri ves čas enakomerno raste (konstanten pretok).

Vendar pa zaradi časovnih omejitev nismo mogli narediti takšnih merskih preverjanj.



Slika 3: Osnovna shema šolskega poskusa; tu h podaja višino vode, ne višine žleba.

Potek poskusa je prikazan na fotografijah na sliki 4.



Slika 4: Nekaj fotografij izvajanja poskusa

Ker je pretok kar velik in je merilna steklena menzura ozka, smo pri meritvi pretoka vodo raje najprej zajeli z manjšo kanglo, ki smo jo držali tik pod spodnjim koncem žleba. Tako smo preprečili izlivanje vode mimo menzure. Potem smo vodo prelili iz kangle v menzuro. Primeren čas merjenja je bil 10 sekund, prvič zaradi računa na pamet po enačbi (1), drugič, ker se je nabrala ravno prava količina pretočene vode v tem času. Kapaciteta menzure je 1000 ml, merjene prostornine pa so bile večinoma manjše. Če volumen pretočene vode presegele to mejno vrednost, smo si pomagali s seštevanjem volumnov v menzuri. Kapaciteta kangle, v katero smo zajemali vodo iz žleba, pa je bila večja od kapacitete menzure.

Pri prikazu rezultatov bomo uporabljali naslednje simbole za opazovane fizikalne količine:

- $2r$ = premer luknjice v zgornji posodi (izvir)
- H_v = višina vode nad središčem luknjice v izviru
- t = čas merjenja (pretoka ali poti koščka lesa/plastike)
- V = volumen pretočene vode (po 1 ali 3 meritve; $t = 10$ s)
- s = pot koščka lesa (trikrat enaka, merimo 3 čase)
- ϕ = volumski pretok
- v = hitrost koščka lesa ali plastike
- h = višina (globina) vode v žlebu
- φ = naklonski kot žleba glede na vodoravnico

Vrstni red prikaza rezultatov meritev in ustreznih računov je v tej predstavitvi drugačen, kot smo poskuse v resnici naredili. Tukaj bomo grupirali rezultate glede na raziskovalna vprašanja.

Meritve pretokov in preverba enačbe (3)

Pri pravokotnem žlebu smo naredili po tri meritve pretoka za vsako višinsko razliko vode nad luknjico, pri okroglem in trikotnem pa po eno. Luknjica je bila vedno ista, njen premer pa $2r = 10$ mm. Tabela 1 podaja rezultate za pravokotni žleb. Nagib cevi je bil $\varphi \approx 9^\circ$.

Tabela 1: Meritve pretoka za pravokotni žleb

H_v (cm)	t (s)	V_1 (ml)	V_2 (ml)	V_3 (ml)	V_p (ml)	ϕ (ml/s)
5	10	460	420	480	453	45,3
10	10	650	740	650	680	68,0
15	10	770	770	720	753	75,3
20	10	850	930	960	913	91,3

V tabeli 1 so V_1 , V_2 in V_3 tri meritve volumna pretočene vode, V_p pa povprečna vrednost treh meritev. Izračunali smo jo kot $V_p = \frac{1}{3}(V_1 + V_2 + V_3)$. Potem smo izračunali še $\phi = \frac{V_p}{t}$. Ocenno napake meritev podamo v posebnem razdelku. Na podoben način merimo pretok pri drugih dveh žlebovih, le da imamo samo po eno meritev volumna pretočene vode. V tabeli 2 primerjamo volumske pretoke za vse tri žlebove, podajamo pa tudi nagibe žlebov. Kote smo izmerili na osnovi višinske razlike obeh koncev žlebov in njihovih dolžin, tako da smo na papirju narisali pomanjšane podobne trikotnike in uporabili kotomer. Za podlaganje zgornjega konca žleba smo uporabili lesene klade, tako da nismo imeli možnosti poljubnega določanja naklonskega kota.

Tabela 2: Primerjava volumskih pretokov za vse tri žlebove

H_v (cm)	Pravokotni (ml/s)	Okrogli (ml/s)	Trikotni (ml/s)
5	45,3	55,0	45,0
10	68,0	70,0	69,5
15	75,3	88,0	83,0
20	91,3	103,0	97,0
ϕ (°)	9	28	5

Ugotovili smo, da so pretoki v okviru natančnosti meritev za vse žlebove enaki, čeprav se močno razlikujejo po dolžini, obliki in tudi po nagibu. S tem smo tudi kvantitativno potrdili prvo hipotezo, da je pretok odvisen samo od izvira – v našem primeru od nivoja vode v zgornji kangli in od premera luknjice po enačbi (3). Tudi ni pomembno, koliko je kangla nad zgornjim koncem žleba. Voda pada v curku na žleb, podobno kot slap. Za odvisnost pretoka od nivoja vode v izviru vzamemo podatke za pravokotno cev. Pri višini vode 20 cm nad luknjico je pretok skoraj natančno dvakrat večji kot pri višini 5 cm. To potrjuje korensko odvisnost ϕ od H_v po enačbi (3). Enačbo preverimo še z neposrednim računom, če vstavimo vanjo podatek $H_v = 20$ cm. Račun da vrednost $\phi = 93,3$ ml/s, kar je zelo blizu izmerjeni vrednosti 91, 3 ml/s. Odvisnost ϕ od H_v pa bomo grafično prikazali pri poskusih z okroglim žlebom v nadaljevanju.

Meritve hitrosti in globine vode

Najprej smo skušali narediti sistematčne meritve pri pravokotnem žlebu, postavitev pa je bila enaka kot pri merjenju pretoka. Vendar pa smo imeli pri tem težave, ker je žleb preširok, tako da voda ni lepo zalila cele širine, ampak je delala meandre, podobno kot pri rekah v sušnem obdobju. Zato so bile nezanesljive meritve tako hitrosti kot globine. Vseeno navajamo podatke zaradi pravilnega velikostnega reda merjenih količin.

Tabela 3: Meritve hitrosti vode za pravokotni žleb

H_v (cm)	s (cm)	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t_p (s)	v (m/s)
5	172	2,16	2,18	2,51	2,28	0,754
10	164	1,75	1,91	2,61	2,09	0,785
15	160	2,13	2,18	2,14	2,15	0,744
20	153	1,43	1,41	2,41	1,75	0,874

Pri primerjavi hitrosti ne opazimo kake sistematičnosti. Delno je težava v reakcijskem času učenca, delno pa tudi v ustavljanju koščka plastike. Poti so različne, ker se pri večanju več domet curka iz luknjice, tako da smo koščke plastike spuščali vedno nekoliko nižje. Meritve debeline so bile še bolj grobe, vrednosti pa so okrog 2 mm do 3 mm, brez opazne sistematike. Zato jih tu niti ne navajamo. Tako so se izračunani pretoki po enačbi (6 a) gibali nekje med 100 ml/s in 170 ml/s, spet brez sistematike naraščanja z nivojem vode nad luknjico. Te vrednosti so prevelike v primerjavi z neposredno izmerjenimi pretoki, glavni razlog pa je v tem, da je »povprečna« globina vode v žlebu precej manjša, kot je izmerjena na nekaj mestih, saj je velik del »struge« suh. Vendar se nam tu vsaj velikostni red izmerjenega in izračunanega pretoka ujema. Pri tem isti velikostni red pomeni ujemanje znotraj faktorja 10. Nivo vode v pravokotnem žlebu je bil premajhen zaradi prevelike širine 6 cm pri naših pretokih. Vseeno pa so bili ti poskusi poučni, ker smo lahko posnemali naravni pojav vijuganja vode v rečni strugi v času majhnega pretoka.

Predvideli smo, da bodo meritve hitrosti in globine pri trikotnem žlebu bolj zanesljive, ker voda zanesljivo napolni dno žleba. Pri vsaki vrednosti H_v smo naredili po dve meritvi časov in po dve meritvi globine. V vsakem paru meritev sta bili vrednosti blizu skupaj, zato tu navajamo le povprečje. Če predvidevamo po celem žlebu enako hitrost vode, tako po dolžini kot po prerezu, je zdaj enačba (6 b) za izračunani pretok: $\phi = h^2 v$. Tabela 4 prikazuje rezultate.

Tabela 4: Račun pretoka za trikotni žleb

H_v (cm)	s (cm)	t_p (s)	v (m/s)	h (mm)	ϕ (ml/s)
5	95	0,96	0,99	7,5	55,7
10	92	0,98	1,02	8,5	73,7
15	89,3	1,01	0,88	10,5	97,0
20	85	0,52	1,63	10,5	179,7

Meritve globine vode so pri trikotnem žlebu videti bolj zanesljive in sistematčne kot pri pravokotnem žlebu. Najbolj negotove so verjetno meritve časa pri spustu koščka plastike zaradi reakcijskega časa. Vendar sta vseeno pretoka, izračunana pri nivojih vode 5 cm in 10 cm nad luknjico, bliže izmerjenima vrednostma kot v primeru pravokotnega žleba. Napaka je večja pri 15 cm in 20 cm.

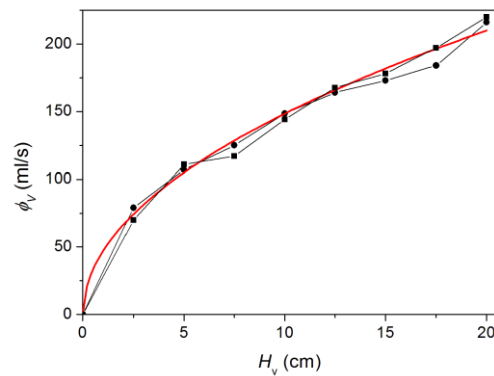
Podajamo še meritve za okrogli žleb, čeprav pretoka tu ne bomo izračunali iz višine in hitrosti vode, ker je enačba za ploščino krožnega odseka na nivoju srednješolske matematike. Vendar pa je rečna struga pogosto najbolj podobna prav okrogli obliki, ki je nekako vmes med pravokotno in trikotno. Zato naredimo pri tej obliki žleba najbolj sistematčne meritve, ki povezujejo pretok z globino. Hitrosti pa tu ne bomo več merili zaradi prekratkega časa potovanja koščka plastike po žlebu, kar daje zelo nezanesljive vrednosti v . Prav globina oziroma višina vodostaja je kritični faktor za nastanek poplav. Direktno teoretično zvezo med pretokom in globino pri danem nagibu struge (žleba) je zelo težko najti, posebno zato, ker je tudi hitrost odvisna od pretoka in oblike struge. Zato so takšni sistematčni poskusi zelo koristni. Poskuse naredimo pri stalnem nagibu okroglega žleba. Da je več možnosti spreminjanja pretoka, smo označili dodatne nivoje vode nad luknjico, potem pa smo luknjico še povečali. Njen novi premer je bil približno 15 mm, višinske razlike gladine vode pa so bile v korakih po 2,5 cm: 2,5 cm, 5 cm, 7,5 cm ... 20 cm. Poskuse smo naredili z dvema različnima nagiboma glede na vodoravnico: $\varphi = 14^\circ$ in 33° . Tabela 5 prikazuje rezultate za oba naklonska kota.

Tabela 5: Pretok in višina vode za okrogli žleb pri dveh naklonskih kotih

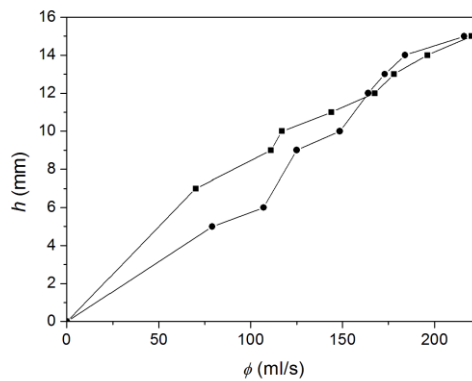
H_v (cm)	ϕ (ml/s)	h (mm)	ϕ (ml/s)	h (mm)
	$\varphi = 14^\circ$		$\varphi = 33^\circ$	
2,5	79	5	70	7
5	107	6	111	9
7,5	125	9	117	10
10	148,5	10	144	11
12,5	164	12	167,5	12
15	173	13	178	13
17,5	184	14	197	14
20	216	15	220	15

Najprej primerjajmo pretoka za okrogli žleb pri $H_v = 20$ cm v tabelah 2 in 5: 103 ml/s in 216 ml/s (drugi stolpec). To, da sta bila naklonska kota zelo različna, 28° in 14° , ni bistveno, kot smo ugotovili že prej. Pretok, podan v tabeli 5, je več kot dvakrat večji kot tisti v tabeli 2. To se kar dobro ujema s povečanjem luknjice: prej je bil premer 10 mm, zdaj pa 15 mm. To pomeni razmerje premerov približno 1 : 1,5, kar daje razmerje ploščin krogov 1 : 2,25. To spet potrjuje enačbo (3). Čeprav sta naklonska kota zelo različna, je globina vode v obeh primerih pri enakem pretoku približno enaka, kar pomeni, da je tudi hitrost vode približno enaka. Vsaj pri naših poskusih je opaziti, da sta hitrost in globina vode v žlebu odvisna predvsem od pretoka, ne pa bistveno od strmine. Seveda pa sta pri enakem pretoku hitrost in globina bistveno odvisna tudi od širine struge. Po pričakovanju sta tudi pretoka (v okviru merske natančnosti) neodvisna od naklonskega kota, ampak samo od izvira, kar smo pri okrogli cevi še enkrat potrdili.

Slika 6 prikazuje graf odvisnosti $\phi(H_v)$, slika 7 pa graf odvisnosti $h(\phi)$. Prva odvisnost je korenska, druga pa je zaradi manjše natančnosti manj očitna. Kaže pa, da odvisnost višine vode od pretoka ni linearna, saj sta grafa pri večjih pretokih bolj položna. Pri grafu $\phi(H_v)$ smo dodali še teoretično krivuljo po enačbi (3), tako da opazimo dobro ujemanje teorije in eksperimenta.



Slika 6: Graf odvisnosti $\phi(H_v)$ za okrogli žleb; teoretična krivulja po enačbi (3) je prikazana s polno debelejšo rdečo črto, eksperimentalna za kot 14° s krožci, za kot 33° pa s kvadrati.



Slika 7: Graf odvisnosti $h(\phi)$ za okrogli žleb; krožci spet ustrezajo kotu 14° , kvadrati pa 33° .

Nazadnje smo izmerili še nekaj parametrov enega od izvirov v Solkanu blizu šole (slika 8). Pretok smo izmerili pri iztekanju iz polnega korita vode. Pretok je bil v tem času (po nekaj deževnih dneh) $\phi = 2250$ ml/s (veliko več kot v šolskih poskusih), s spuščanjem koščkov plastike pa smo izmerili še hitrost vode v koritu: $v \approx 2$ cm/s. Tako majhna hitrost je bila pričakovana zaradi velike širine korita $a = 80$ cm. Ocenili smo lahko značilno globino premikanja vrhnjih plasti po enačbi (6 a) za pravokotni žleb: $h = \frac{\phi}{av} = 14$ cm. Globina korita je 50 cm. To razliko se da lepo razložiti s tem, da je korito pri izlivu zagrajeno, tako da teče voda čezenj. Korito lahko primerjamo s strugo reke z jezom.



Slika 8: Izvir s koritom v Solkanu in meritve

Ocena napak meritev

Absolutno napako pri merjenju višinske razlike H_v v kangle ocenimo na $\Delta H_v \approx 5$ mm do 10 mm. K njej prispevajo napaka pri merjenju in označevanju višine nad luknjico (oznaka je bila s flomastrom na zunanji strani kangle, zaradi prosojnosti pa se jo je videlo tudi na notranji strani), nekaj nihanja višine vode (zaradi uravnavanja gladine na črtici z dolivanjem), pa tudi zaradi tega, ker luknjica ni imela popolnoma okroglo obliko. Manjšo napako 5 mm pripišemo manjšim višinskim razlikam, ker voda počasneje izteka in jo je lažje uravnavati z dolivanjem. Večjo napako 10 mm pripišemo večjim višinskim razlikam. Relativna napaka je količnik med absolutno napako in izmerjeno (povprečno) vrednostjo. Pri višinski razliki 5 cm je zato ocenjena relativna napaka $\frac{\Delta H_v}{H_v}$ enaka 10 %, pri višinski razliki 20 cm pa 5 %.

Absolutno napako premera luknjice ocenimo na 1 mm; relativna napaka pri premeru 10 mm je potem 10 %.

Relativna napaka merjenja pretoka vode je posledica dveh napak: pri merjenju časa (v našem primeru stopanje 10 s) in pri merjenju prostornine vode v menzuri. Relativno napako merjenja časa ocenimo, če vzamemo reakcijski čas 0,5 s. Tako je relativna napaka časa največ 5 %. Meritev prostornine je natančnejša, saj se jo da v visoki menzuri zelo dobro razbrati. Zato je relativna napaka pretoka vode 5 % zaradi relativne napake merjenja časa. Vseeno pa pride tudi do nekaj pljuskanja vode pri večjih pretokih.

Manj zanesljive so bile meritve višine in hitrosti vode, tako da so podani rezultati, npr. na sliki 7, bolj kvalitativne narave.

V šoli smo uporabili preproste pripomočke, ki smo jih imeli na razpolago. Boljši od kangle kot izvira bi bil velik sod, saj bi se zaradi večje osnovne ploskve v času merjenja sprememba nivoja vode nad luknjico ne bi nič poznala. Tedaj bi lahko imeli tudi večje pretoke, tako da bi voda bolj napolnila žlebove in bi s tem postalo zanesljivejše merjenje višine h . Namesto menzure pa bi uporabili kar večjo kanglo z znano prostornino in bi merili čas, da se napolni.

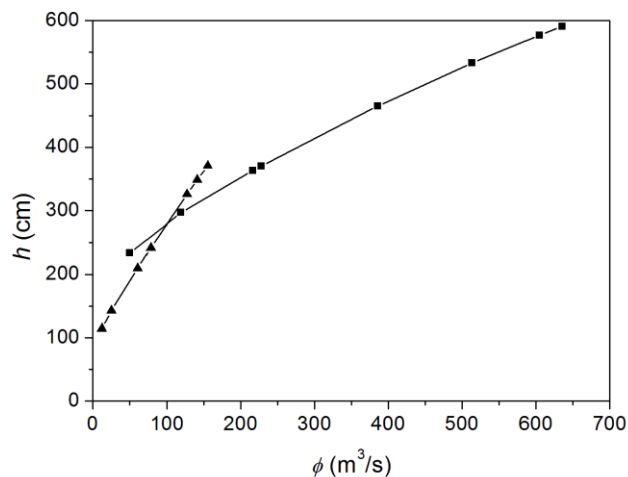
Nekaj podatkov o naših rekah in poplave

Vrnimo se k problemu poplav v Sloveniji. Te so povezane z vodostajem (višino vode v strugi) in pretokom. V Sloveniji se več institucij ukvarja s podatki, tudi s preventivnimi opozorili, o tekočih vodah. Omenimo Agencijo Republike Slovenije za okolje (ARSO), ki med drugim zbira in objavlja tudi podatke o tekočih vodah [5]. ARSO sproti objavlja podatke avtomatskih hidroloških postaj, za vzorec in boljšo predstavo o realnih podatkih pa navedimo v tabeli 6 podatke (pretok in višino) za pet voda. Razen Drave in Save, ki najbolj poplavljata, smo v prikazu izbrali še tri primorske tekoče vode: Sočo, ker teče mimo Solkana in Nove Gorice, Vipavo, ki je npr. že poplavlja v nekaterih naseljih, ter potok Koren v Novi Gorici. Tudi ta je že poplavljal, čeprav je veliko manjši od rek. Soča sicer ni znana po poplavih, vseeno pa je lani ob močnem deževju zelo narasla, tako da so grozile poplave, npr. v kraju Deskle. ARSO poleg takšnih podatkov objavlja tudi opozorila na morebitne poplave.

Tabela 6: Pretok in višina vode za pet tekočih voda. Podatki so bili izmerjeni 26. marca ob 8h. Drugi stolpec podaja merilno mesto, ker jih imajo večje reke več takšnih hidroloških postaj vzdolž struge.

Reka	Kje	Pretok (m ³ /s)	Višina (cm)
Drava	Ptuj	392,6	493
Sava	Medno	91,85	152
Soča	Solkan	118,7	297
Vipava	Miren	11,78	114
Koren	Nova Gorica	0,037	94

Tabela 6 je zelo poučna, saj med drugim pokaže zelo velik razpon vrednosti pretokov, Drava pa ima daleč največjega. Višine vode se tudi zelo razlikujejo, čeprav ne tako zelo kot pretoki. Treba pa je upoštevati tudi zelo različne širine tekočih voda. Na primer, Drava nima samo nekaj več kot petkrat večje globine (višine) kot potok Koren, temveč je razlika v širini njunih strug še precej bolj bistvena za pretok. Vendar bi bilo še bolj zanimivo redno spremljati za daljše obdobje oba podatka, pretok in višino, vedno za isto reko in na istem mestu. Za to nam je zmanjkalo časa, ker smo na to možnost pomislili prepozno. Je pa to zamisel za teoretično nadaljevanje raziskave. Na primer, veliko število podatkov za pare pretok reke - višina na nekem mestu sortiramo po velikosti pretokov in narišemo graf odvisnosti višine od pretoka, podobno kot smo naredili v šoli (slika 7). Tako lahko najdemo tudi kritično vrednost pretoka, ko postane višina vode v reki prevelika in nastane nevarnost za poplavo. Vseeno pa smo zabeležili podatke za Sočo in Vipavo v času okrog 10 dni (konec marca in začetek aprila), ko je bilo veliko padavin in so bili pretoki zelo spremenljivi. Grafa za obe reki sta prikazana na sliki 9.



Slika 9: Grafa odvisnosti $h(\phi)$ za Vipavo (trikotniki) in Sočo (kvadratki)

Za oba grafa je očitno, da nista premici, saj bi namreč pretoku nič ustrežala tudi višina vode nič. Vendar je pri Soči bolj razvidna ukrivljenost grafa. Čeprav imata reki v povprečju precej različna pretoka (Soča je bolj vodnata), pa so največji pretoki Vipave večji od najmanjših pretokov Soče. Vipava je v splošnem tudi nižja (plitvejša), vendar so njene največje višine večje od najmanjših višin Soče. Nobena od obeh rek ne presahne, vseeno pa na obeh grafih na sliki 9 vidimo, da bi morala biti za zelo majhne (čeprav samo teoretične) pretoke precej strmejša. Na grafih vidimo tudi, da ima pri enaki višini Vipava manjši pretok, ker je ta odvisen tudi od širine reke. Na primer, na zemljevidu smo ocenili, da je širina Soče v Solkanu nekje med 30 m in 40 m, medtem ko je širina Vipave v Mirnu okrog 20 m. Seveda sta to samo neki okvirni vrednosti širin, ker se lahko tudi širina reke poveča, ko naraste, saj bregovi nikoli niso navpični. Lahko pa domnevamo, da sta obliki strug obeh rek sicer podobni, saj sta v omenjenih krajih izrazito ravninski reki. S primerjavo slik 7 in 9 pa lahko v splošnem trdimo, da so si grafi odvisnosti višine vode od pretoka dokaj podobni, pa naj gre za zelo majhne pretoke, kot pri poskusih v šoli, ali pa za pretoke večjih rek.

Zavedati se moramo tudi tega, da pretok vzdolž večjih rek ni povsod enak vzdolž struge, ker imajo pritoke. Zato se njihov pretok na poti proti morju ali izlitju v še večje reke povečuje. Takšni sta tudi Vipava in Soča; Vipava se npr. izlije v Sočo nekoliko naprej od Mirna.

4 SKLEP

Ugotovili smo, da so bile naše delovne hipoteze pravilno postavljene. Pretok tekoče vode je odvisen od izvira in njegovih lastnosti, ne pa od parametrov žlebov, s katerimi smo modelirali različne rečne struge. Za izvir smo pri naših poskusih uporabili stoječo vodo v kangli z luknjico za iztek vode. Žlebovi pa s svojimi fizikalnimi lastnostmi, npr. z nagibom, vplivajo na višino in hitrost tekoče vode. Najpomembnejša pa se nam zdi zveza med prostorninskim pretokom in višino vode: čim večji je pretok, tem večja je višina vode. To zlahka opazimo tudi pri naših rekah: ko se z obilnimi padavinami poveča njihov pretok, reke

močno narastejo. Meritev pretoka je bila bolj zanesljiva kot meritve hitrosti in višine vode v žlebovih.

Naša raziskava daje nekaj namigov tudi, kako natančneje kvantitativno povezati pretok in višino vode. Za primerjavo bi morali vzeti reko ali potok, kjer pretok čez leto močno niha, ter zapisovati sprotne podatke merilnih postaj. Vedno pa je treba pretok primerjati na istem mestu, prvič, ker se zaradi pritokov pretok večjih rek vzdolž toka povečuje, drugič, ker se tudi oblika struge spreminja. Navadno se struga proti izlivu reke postopno širi, vendar se vmes tudi nepravilnosti, npr. lokalno močno razširjena struga. Vseeno smo ugotovili, da se odvisnost višine vode od pretoka vede precej podobno, pa naj gre za zelo majhne ali pa velike pretoke (primerjava slik 7 in 9).

Če pa je reka majhna in plitva, da se jo da na kakem mestu lepo prebresti, lahko sami naredimo preproste meritve globine od brega do brega.

Poplavam se da vsaj delno izogniti s primerno regulacijo rek, npr. s poglobitvijo struge, ali pa nasprotno z nasipi.

5 MATEMATIČNI DODATEK

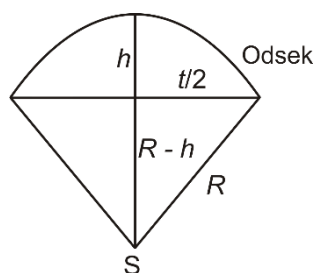
Izračun polmera polnega kroga za prerez okroglega žleba gre tako. Geometrija je prikazana na sliki 10. Naj bosta višina odseka h in tetiva t . Ustrezni pravokotni trikotnik ima kateti $R - h$ in $\frac{t}{2}$, hipotenuza pa je R . Pitagorov izrek nam pove:

$$R^2 = (R - h)^2 + \left(\frac{t}{2}\right)^2$$

$$R^2 = R^2 - 2Rh + h^2 + \left(\frac{t}{2}\right)^2$$

$$R = \frac{1}{2h} \left[h^2 + \left(\frac{t}{2}\right)^2 \right]$$

Pri podatkih $t = 50$ mm in $h = 20$ mm izračunamo $R = 25,6$ mm.



Slika 10: Izračun polmera kroga po Pitagorovem izreku

VIRI

- (1) Fotografije: arhiv mentorice Mojce Milone
- (2) Sheme: mentor Milan Ambrožič (narejene s programom CorelDraw)

(3) Grafi: mentor Milan Ambrožič (narejene s programom Origin)

Drugi viri:

[1] Direkcija Republike Slovenije za vode, *Poplave 2023*, spletna stran:

[Direkcija Republike Slovenije za vode | Poplave 2023 \(evode.si\)](https://evode.si/)

[2] M. Hribar, S. Kocjančič, A. Likar in drugi, *Mehanika in toplota, Fizika za 1. in 2. letnik srednjih šol*, Modrijan, Ljubljana 2000.

[3] Janez Strnad, *Fizika: Mehanika, toplota, Del 1*, DMFA, Ljubljana 1985.

[4] Halliday, Resnick, Walker, *Fundamentals of Physics*, John Wiley & sons, Inc., Cleveland.

[5] Republika Slovenija, Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo, Agencija Republike Slovenije za okolje, *Zadnji podatki samodejnih hidroloških postaj*, spletna stran:

[Zadnji podatki samodejnih hidroloških postaj \(gov.si\)](https://gov.si/)