

REGULACIJA REKA

VEŽBE

Student

Broj indeksa Grupa

Datum														
Overa prisustva														

Datum														
Overa prisustva														

Vežba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Lab
Overa vežbe														

Definitivna overa

Datum

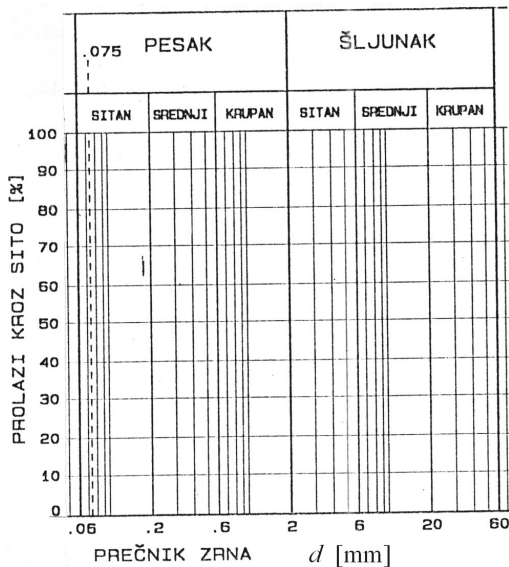
Ulazni podaci

- Karakteristični protoci [m^3/s]:

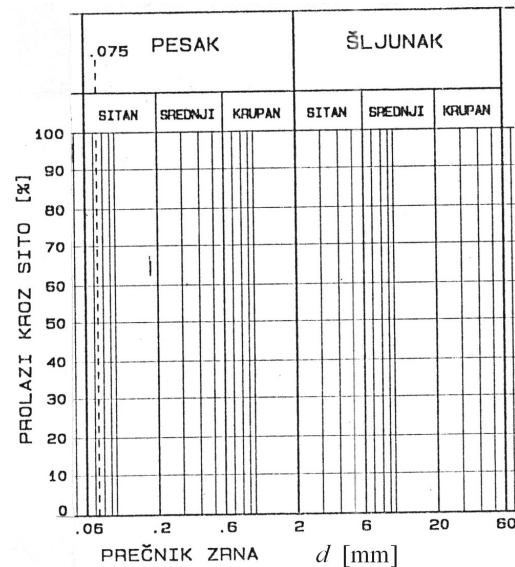
Q_{mv}	Q_{sv}	Q_{svv}	$Q_{1\%}$

- Protok za ručni proračun linije nivoa: $Q = \dots\dots\dots \text{m}^3/\text{s}$.
- Broj profila u kome se računa tangencijalni napon: $\dots\dots\dots$
- Referentna koncentracija suspendovanog nanosa: $C_a = \dots\dots\dots \text{gr/l}$.
- Krive granulometrijskog sastava:

Vučeni nanos



Materijal obale



Uslovi za sticanje potpisa i polaganje ispita

1. Pohadjanje vežbanja je obavezno. *Uslov za sticanje potpisa u indeks je 80 % evidentiranog prisustva na predavanjima, odnosno 90 % na vežbanjima, kao i overen godišnji rad.*
2. Obaveza je studenata da samostalno izrade godišnji rad, koji se sastoji od računskih i laboratorijskih vežbi. Potrebno je da na časovima vežbanja imaju sav neophodan pribor (udžbenik, kalkulator, lenjiri, šestar itd.). Uputstva u vezi sa proračunima, merenjima u laboratoriji i korišćenjem računara, studenti će dobiti od asistenta i predmetnog nastavnika, na času ili u terminima predviđenim za konsultacije.
3. U interesu je studenata da provere svoje znanje tako što će odgovoriti na pitanja sadržana na kraju svake vežbe. To će im olakšati overu godišnjeg rada i polaganje ispita.
4. Završeni godišnji rad stavlja se na uvid asistentu ili predmetnom nastavniku da ga svojim potpisom overe. Tom prilikom, student treba svojim odgovorima na postavljena pitanja da pokaže da je uspešno savladao gradivo. Rad se studentu može vratiti na doradu, ukoliko nije kompletan ili ima grešaka, kao i ukoliko svojim odgovorima student ne pokaže da ga je samostalno izradio. *Pozitivno ocenjen (overen) godišnji rad predstavlja uslov za izlazak na ispit.*
5. Po važećem nastavnom planu, za izlazak na ispit iz Regulacije reka potrebno je prethodno položiti ispite iz Hidraulike I i Hidrologije. *Na pismenom delu ispita nije dozvoljeno korišćenje rešenih ispitnih zadataka. Dozvoljeno je korišćenje udžbenika i elaborata.* Ukoliko se za proračun linije nivoa koristi gotov program, neophodno je priložiti objašnjenje algoritma. Pismeni deo ispita traje četiri sata. Prvih pola sata se radi test koji je eliminacionog karaktera, a preostala tri i po sata rade se zadaci. Studentu koji ne položi test, ne ocenjuju se uradjeni zadaci.

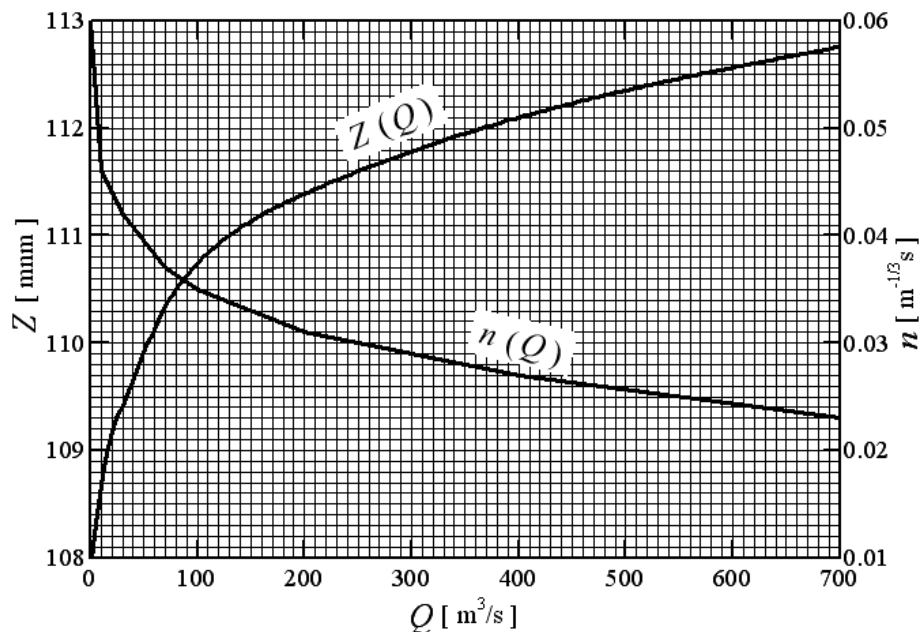
VEŽBE IZ PREDMETA „REGULACIJA REKA”

Vežba br. 1

Podloga za vežbe je situacioni plan reke Velike Morave u razmeri 1:5000 (poseban dodatak ovom tekstu). Na situaciji je prikazana rečna deonica sa 24 poprečna profila. Njihove koordinate čine računarsku bazu podataka koja se koristi u ovim vežbama. U prilogu je dat grafički prikaz 6 izabranih profila.

a) Očitavanjem situacionog plana, nacrtati poprečni profil br. 24 (km 180+395) i definisati odgovarajuću zavisnost $AR^{2/3}(Z)$.

b) Koristeći 6 izabranih profila sa odgovarajućim funkcijama $AR^{2/3}(Z)$, sračunati ručno liniju nivoa za protok koji je zadat kao ulazni podatak. Granični uslov je kriva protoka $Q(Z)$ prikazana na Slici 1. Na istoj slici je data i zavisnost Manningovog koeficijenta otpora od protoka.



Slika 1: Kriva protoka i zavisnost Manningovog koeficijenta od protoka

c) Koristeći sve raspoložive poprečne profile iz baze podataka, sračunati pomoću računara linije nivoa za zadate vrednosti karakterističnih protoka: Q_{mv} , Q_{sv} i Q_{svv} . Početne kote nivoa i odgovarajuće vrednosti Manningovog koeficijenta, očitati sa dijagrama na Slici 1.

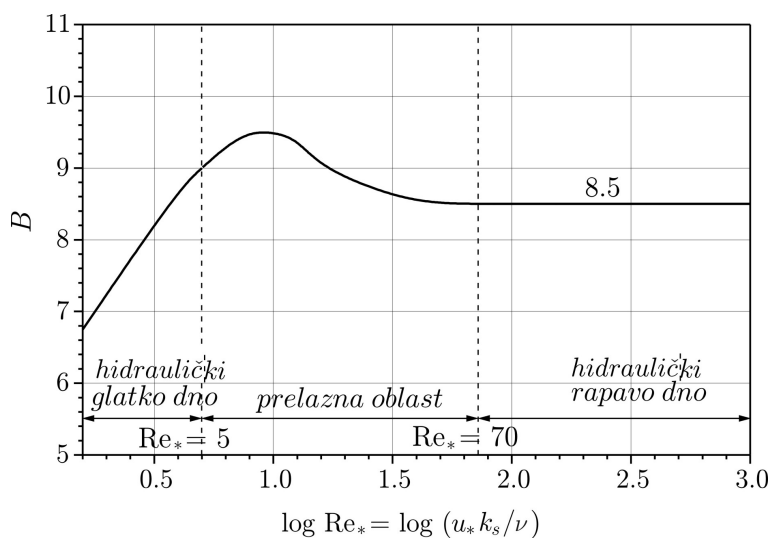
Pitanja:

1. Koje se jednačine koriste za proračun linije nivoa u prirodnim vodotocima, ako se pretpostavi ustaljeni režim tečenja?
2. Objasniti algoritam za proračun linije nivoa pomoću računara.
3. Kako se obavlja proračun u slučaju promene režima tečenja i pojave hidrauličkog skoka?
4. Na koji se način obuhvataju lokalni gubici?
5. U čemu se razlikuju „koeficijent rapavosti” i „koeficijent otpora”?

Vežba br. 2

Za rečnu deonicu iz Vežbe br. 1 potrebno je:

- Utvrđiti vrednost Maningovog koeficijenta otpora (n) pomoću snimljene linije nivoa, definirane kotama na situaciji. U momentu snimanja, protok u reci je iznosio: $23 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Sračunati vrednost tangencijalnog napona i odgovarajuće smičuće brzine pri protoku Q_{sv} u profilu koji je zadat ulaznim podacima.
- Koristeći dijagram na Slici 2, pokazati da je karakter tečenja u datom profilu turbulentan, po „hidraulički rapavom dnu”. Napisati jednačinu logaritamskog rasporeda brzine po dubini i sračunati vrednosti brzine u nekoliko tačaka duž osovine toka pri Q_{sv} . Rezultate prikazati grafički. Vrednost kinematičkog koeficijenta viskoznosti iznosi: $\nu = 1,0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Pretpostaviti da je apsolutna rapavost: $k_s = 10 \text{ mm}$.
- U zadanom profilu sračunati vrednost srednje brzine po dubini na mestu osovine toka pri Q_{sv} .
- Nacrtati dijagram rasporeda tangencijalnog napona duž iste vertikale (osovine toka), kao i dijagram rasporeda tangencijalnog napona po širini datog profila.



Slika 2: Pomoćni dijagram za određivanje logaritamskog rasporeda brzine po dubini

Pitanja:

1. Određivanje vrednosti koeficijenta otpora.
2. Teorijski raspored brzine po dubini prirodnih vodotoka.
3. Raspored tangencijalnog napona po dubini i njegova podela.

Vežba br. 3

U Tabeli 1 dati su rezultati merenja jediničnog pronosa vučenog nanosa u najuzvodnijem profilu br. 24. Pomoću ovih podataka odrediti vrednosti parametara obrasca Majer-Peter i Milera (MPM), a zatim koristiti ovaj obrazac za proračun transportnog kapaciteta na celoj razmatranoj deonici – u svim računskim profilima. Ovo obaviti za najmanje tri protoka: Q_{mv} , Q_{sv} i Q_{svv} , koristeći rezultate hidrauličkog proračuna iz Vežbe br. 1. Pretpostaviti da se nanos kreće u pojasu B_v koji je približno jednak širini vodnog ogledala pri Q_{mv} , kao i da se širina B_v ne menja sa protokom. Granulometrija nanosa zadata je u okviru ulaznih podataka. Gustina nanosa iznosi: $\rho_s = 2,65 \text{ t/m}^3$.

Na osnovu dobijenih rezultata, odrediti prosečni godišnji pronos vučenog nanosa u profilu br. 24. Kriva trajanja protoka u ovom profilu definisana je podacima u Tabeli 2.

Tabela 1

$Q \text{ [m}^3/\text{s]}$	100	350	393	502	612	698
$q_{vm} \text{ [kg/(sm)]}$	0	0,019	0,029	0,061	0,108	0,255

Tabela 2

$Q \text{ [m}^3/\text{s]}$	800	500	300	200	100	35	0
$T \text{ [dani]}$	10	35	90	140	240	362	365

Pitanja:

1. Struktura empirijskih obrazaca za proračun pronosa vučenog nanosa na bazi kritičnog tangencijalnog napona.
2. Uslovi pod kojima je izveden obrazac MPM i domen njegove primene.
3. Proračun godišnjeg pronosa vučenog nanosa.

Vežba br. 4

Koristeći raspored brzine po vertikali iz Vežbe br. 2, sračunati raspored koncentracije suspendovanog nanosa po dubini prema teorijskom izrazu Rausa. Srednji prečnik taloženja iznosi 0,1 mm. Referentna koncentracija data je u okviru ulaznih podataka. Sračunati raspored koncentracije prikazati grafički. Odrediti jedinični pronos suspendovanog nanosa u datoj vertikali.

Pitanja:

1. Odredjivanje brzine tonjenja čestica. Faktori koji utiču na ovu brzinu.
2. Uloga turbulentne difuzije u održanju čestica nanosa u suspenziji. Pojam kinematičkog koeficijenta turbulentne viskoznosti.
3. Teorijske krive rasporeda koncentracije nanosa po dubini. Ocena parametara i njihova zavisnost od krupnoće čestica i karakteristika toka.
4. Proračun pronosa suspendovanog nanosa.

Vežba br. 5

Sračunati opštu deformaciju rečnog korita na posmatranoj deonici za protok Q_{svv} , pod pretpostavkom da je uticaj vučenog nanosa dominantan i da nema uslova za istaložavanje suspendovanog nanosa. Poroznost nanosa iznosi 40%. Ostale neophodne podatke preuzeti iz Vežbe br. 3. Grafički prikazati deformaciju u izabranom poprečnom profilu.

Pitanja:

1. Opšta i lokalna deformacija rečnog korita.
2. Bilansna jednačina za proračun opšte deformacije.

Vežba br. 6

Metode matematičke statistike mogu se uspešno koristiti u morfološkoj analizi rečnog korita u prirodnom režimu. Nacrtati uzdužni dijagram promene širine vodnog ogledala za protok Q_{sv} , koristeći rezultate proračuna iz Vežbe br. 1. Odrediti širinu vodnog ogledala merodavnu za regulisanje ove deonice (B_r).

Pitanja:

1. Svrha morfološke analize rečnog korita. Vrste uzdužnih morfoloških dijagrama.
2. Morfološke krive zastupljenosti i učestalosti – konstrukcija i korišćenje.

Vežba br. 7

Regulisati datu deonicu Velike Morave koristeći regulacionu širinu B_r iz prethodne vežbe. Dati rešenje u dve varijante: (i) regulisano korito po trasi postojećeg korita i (ii) regulisano korito sa prosecanjem krivine. U obe varijante potrebno je povući novu osovину za protok Q_{sv} i upisati novu stacionažu, kao i elemente krivina u odnosu na osovину nove trase. Definisati tip i položaj neophodnih regulacionih gradjevina. Položaj gradjevina naznačiti odgovarajućim oznakama na situaciji, uzdužnom profilu i poprečnim profilima. Na situaciji i u poprečnim profilima šrafirati zone iskopa i nasipanja.

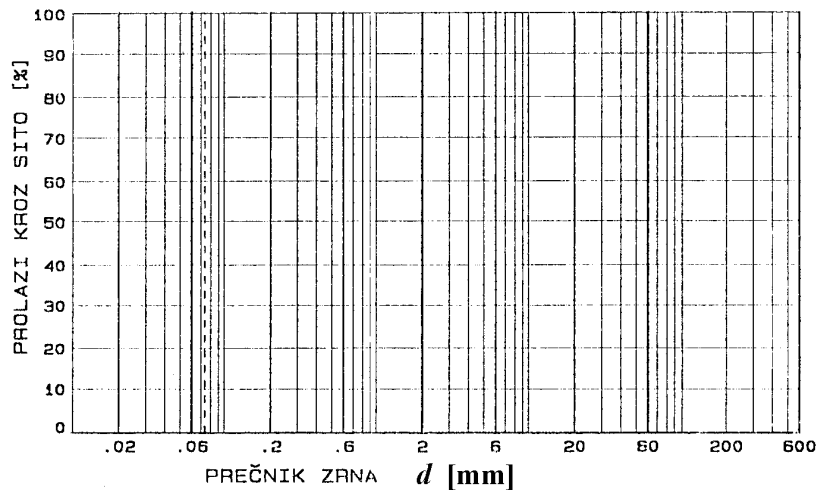
Pitanja:

1. Principi trasiranja i izbor regulacionih elemenata.
2. Vrste gradjevina, njihovi geometrijski elementi i položaj u koritu.
3. Prosecanje krivine kao regulaciona mera. Pozitivni i negativni efekti prosecanja.
4. Tehnologija izgradnje preseka i gradjevine u sklopu presecanja krivna.

Vežba br. 8

Dimenzionisati obaloutvrdu predviđenu regulacijom korita u prethodnoj vežbi, pri čemu proračun vezati za konkretan izabrani profil. Granulometrijska kriva materijala obale data je u ulaznim podacima. Zapreminska masa materijala obale iznosi $2,65 \text{ t/m}^3$, a ugao unutrašnjeg trenja 32° .

- a) Odrediti krupnoću kamenog nabačaja i na Slici 3 nacrtati granulometrijsku krivu kamene obloge. Debljina obloge iznosi $1,5 \times d_{100}$. Nagib obaloutvrde odrediti tako da je ugao koji ona zaklapa sa horizontalom bar za 5° manji od ugla unutrašnjeg trenja materijala obale.
- b) Dimenzionisati peščani filter obaloutvrde vodeći računa o kriterijumima stabilnosti, oblika zrna i vodopropusnosti. Proveriti odnos usvojenog filtra i kamenog nabačaja primenom istih kriterijuma. Prikazati usvojeni granulometrijski sastav peščanog filtra na Slici 3.
- c) Dimenzionisati nožicu obaloutvrde sa koeficijentom sigurnosti 1,5.
- d) Prikazati poprečni presek obaloutvrde u izabranom profilu u razmeri 1:50 sa svim karakterističnim kotama i konstruktivnim detaljima (kamena obloga, filter, nožica itd.).



Slika 3: Granulometrijske krive materijala iz obale, pešćanog filtra i kamene obaloutvrde

Pitanja:

1. Obaloutvrda kao regulaciona gradjevina – uloga, položaj, nagib, karakteristične kote.
2. Osnovni elementi obaloutvrde, konstruktivne karakteristike i vrste materijala.
3. Prave paralelne gradjevine – uloga, osnovni elementi i dimenzije.

Vežba br. 9

Dimenzionisati napere projektovane u Vežbi br. 7. Sračunati potreban broj napera ako je optimalni razmak napera definisan izrazom:

$$L < \frac{R^{4/3}}{2g \cdot n^2},$$

gde je R – hidraulički radijus, n – Maningov koeficijent, a g – gravitaciono ubrzanje.

- a) Pokazati primenom Bernulijeve jednačine da se gornji izraz može izvesti iz uslova da se u medjunaperskom polju formira povratno strujanje koje izaziva istaložavanje nanosa.
- b) Nacrtati izgled, osnovu i poprečni presek izabranog napera u razmeri 1:100, sa svim neophodnim kotama i konstruktivnim detaljima.

Pitanja:

1. Uloga napera kao regulacione gradjevine i njegov položaj u rečnom koritu.
2. Geometrijski elementi napera i konstruktivne karakteristike (kote, nagibi, vrste materijala).
3. Način gradjenja napera.

Vežba br. 10

Projektovati nasip za veliku vodu $Q_{1\%}$ čija je vrednost zadata u ulaznim podacima. Vrednost koeficijenta otpora u levoj inundaciji iznosi 0,035, a u desnoj, $0,030 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$.

Na uzdužnom profilu regulisanog korita, grafički prikazati liniju nivoa za $Q_{1\%}$ i liniju krune nasipa.

U profilu br. 14 sračunati raspodelu protoka na glavno korito i inundacije pri koti nivoa koja je za 0,15 m niža od kote nivoa pri $Q_{1\%}$. Pretpostaviti da je nagib linije energije u datom profilu jednak nagibu linije energije pri $Q_{1\%}$. Sračunati vrednost Koriolisovog koeficijenta neravnomernosti brzine po poprečnom preseku, kao i kotu energije.

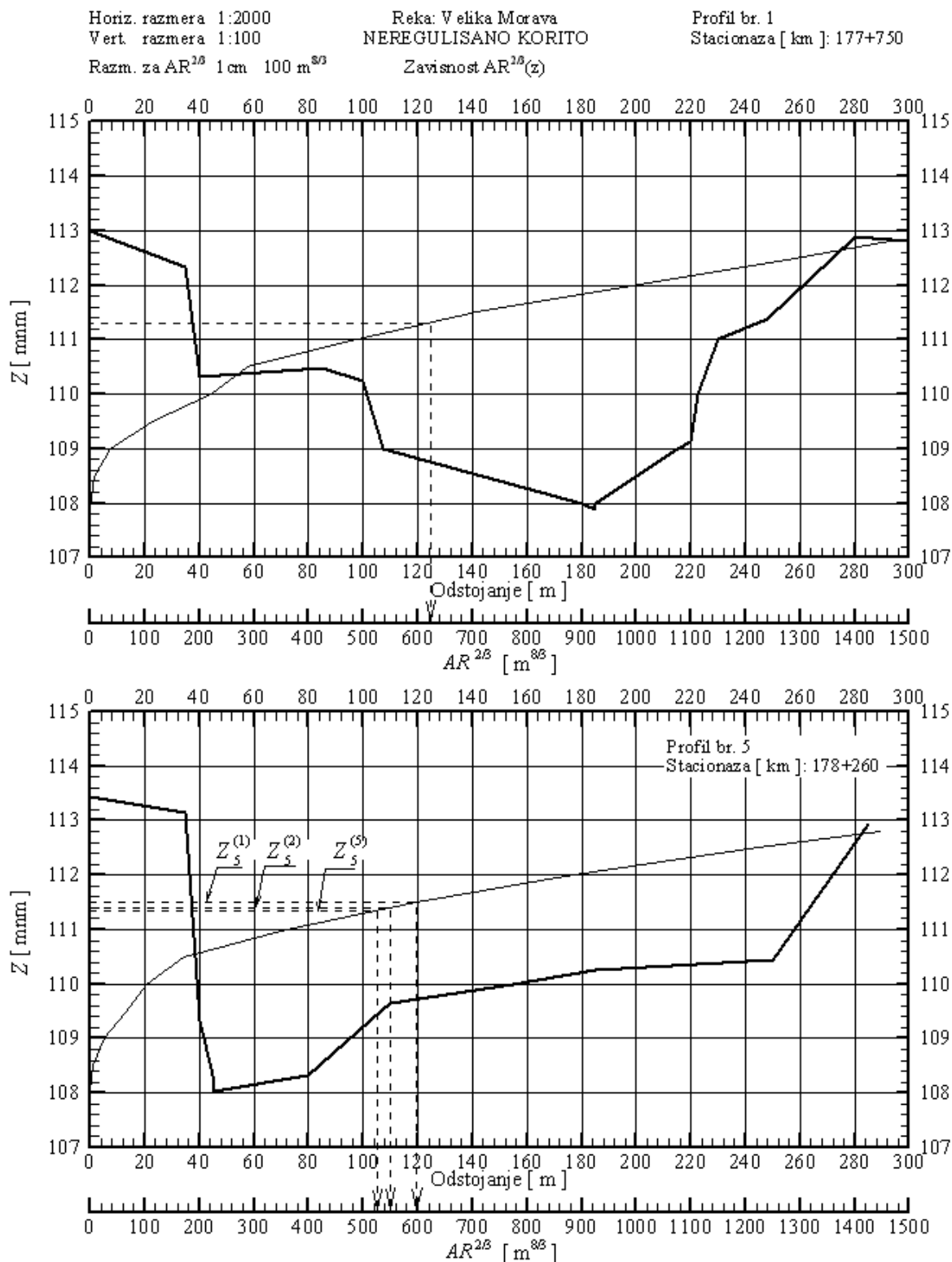
Pitanja:

1. Uloga nasipa kao regulacione gradjevine. Dimenzionisanje i trasiranje nasipa.
2. Konstruktivne karakteristike nasipa i vrste materijala.
3. Podela složenog poprečnog preseka na hidraulički homogene delove – segmente.

PRIMERI REŠENJA

Vežba br. 1

Na Slici 1.1 prikazana su dva profila (nizvodni, br. 1 i uzvodni, br. 5), sa pomoćnim funkcijama $AR^{2/3}$ koje se koriste u ručnom iterativnom proračunu linija nivoa.



Slika 1.1: Računski profili i pomoćne funkcije $AR^{2/3}(Z)$

U Tabeli 1.1 je prikazan postupak ručnog proračuna nepoznate kote nivoa u uzvodnom profilu br. 5, za protok $Q = 180 \text{ m}^3/\text{s}$ i vrednost Maningovog koeficijenta $n = 0,032 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$. Početna kota nivoa u profilu br. 1 iznosi 111,31 mm (polja C5 i J5).

Tabela 1.1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	$Q =$	180	m^3/s	$n =$	0.032	$\text{m}^{-1/3}/\text{s}$						
2												
3	p.presek	pretpostavljena	Z	$AR^{2/3}$	$1/AR^{2/3}$	"S"	\bar{I}_e	Δx	ΔZ	Z	ϵ	iteracija
4	broj	kota	[mm]	[$\text{m}^{8/3}$]	[$10^{-6} \text{ m}^{-16/3}$]	[$\text{m}^{-16/3}$]	[10^{-6}]	[m]	[m]	[mm]	[m]	
5	1		111.31	623	2.576			510		111.31		
6	5	$Z_5^{(1)} =$	111.500	598	2.796	2.686	89.1		0.045	111.350	0.150	1
7	5	$Z_5^{(2)} =$	111.400	550	3.306	2.941	97.6		0.050	111.355	0.045	2
8	5	$Z_5^{(3)} =$	111.350	525	3.628	3.102	102.9		0.052	111.357	-0.007	3
9	5	$Z_5^{(4)} =$	111.355	528	3.587	3.082	102.2		0.052	111.357	-0.002	4
10	5	$Z_5^{(5)} =$	111.357	529	3.573	3.07496	102.02		0.052	111.36	0.000	kon. rešenje
11												

Iterativni računski postupak sastoji se u pretpostavljanju nepoznate kote Z_5 (kolona B), očitavnu odgovarajuće vrednosti ($AR^{2/3}$) sa dijagrama na Slici 1.1 i rešavanju Bernulijeve jednačine održanja energije, napisane u obliku:

$$\Delta Z = Z_5 - Z_1 = (nQ)^2 \cdot \underbrace{\frac{1}{2} \left[\frac{1}{(A_1 R_1^{2/3})^2} + \frac{1}{(A_5 R_5^{2/3})^2} \right]}_{\text{"S"}} \cdot \Delta x = \bar{I}_e \cdot \Delta x. \quad (1)$$

Računska kota Z u koloni J dobija se sabiranjem pretpostavljene kote (kolona B) i razlike ΔZ , sračunate po izrazu (1) (kolona I). Kriterijum konvergencije je da razlika između pretpostavljene i računске kote (ϵ) bude ispod neke prihvatljive (dovoljno male) vrednosti. Iz kolone J se vidi da su prva četiri rešenja odbačena (precrtane vrednosti), a da je tek u petoj iteraciji dostignuto konačno rešenje, pri kome je vrednost ϵ svedena na nulu.

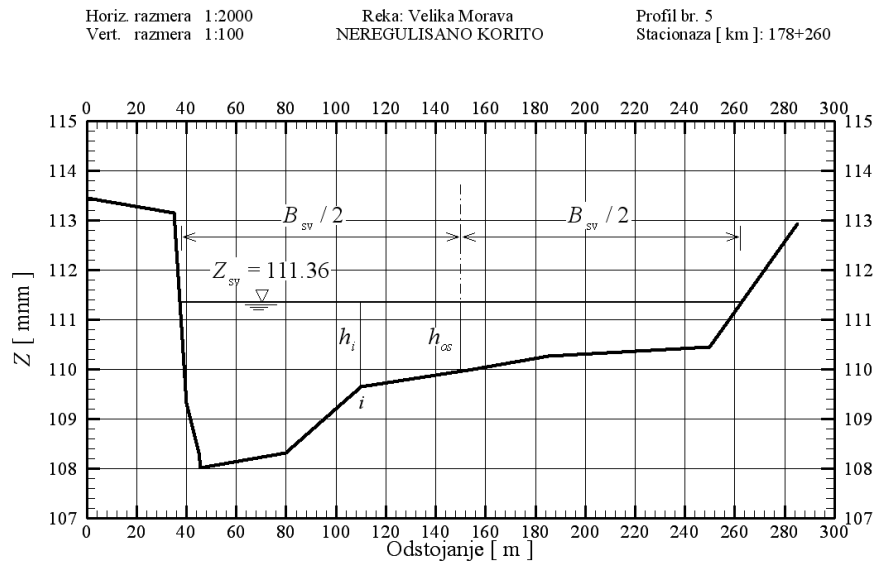
Vežba br. 2

a) Kalibracija Maningovog koeficijenta otpora deonice (n) može se obaviti probanjem, tako što se za više pretpostavljenih vrednosti koeficijenta n sračunaju linije nivoa i uporede sa snimljenom linijom. Usvaja se ona vrednost n koja daje najbolje slaganje računске i snimljene linije nivoa. Alternativno, može se primeniti direktan postupak zasnovan na formuli (lit. [1], tačka 6.7, str. 166–169):

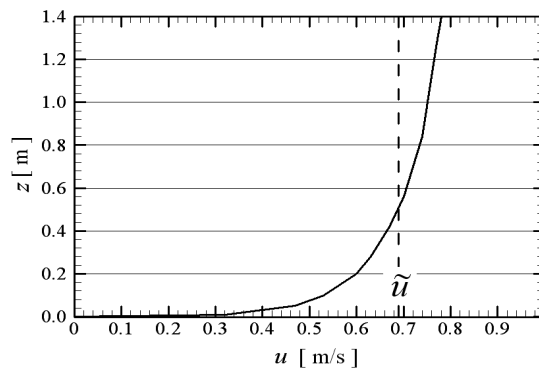
$$n = \frac{1}{Q} \left\{ \frac{E_1 - E_N}{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} \left[\frac{1}{(AR^{2/3})_i^2} + \frac{1}{(AR^{2/3})_{i+1}^2} \right] \Delta x_i} \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

gde indeks $i = 1, 2, \dots, N = 24$ označava broj profila. Energetske kote na krajevima deonice E_1 i E_N , kao i vrednosti funkcije $(AR^{2/3})_i$ računaju se na osnovu snimljenih kota nivoa.

b) Na Slici 2.1 prikazan je izabrani profil sa kotom nivoa koja odgovara protoku Q_{sv} . Vrednost globalnog tangencijalnog napona u ovom profilu iznosi: $\tau_o = \rho \cdot g \cdot R \cdot I_e = 1000 \cdot 9,81 \cdot 1,63 \cdot 1,02 \times 10^{-4} = 1,63$ Pa, a vrednost globalne smičuće brzine je: $V_* = \sqrt{\tau_o / \rho} = 0,04$ m/s.



Slika 2.1: Položaj računске vertikale



Slika 2.2: Logaritamski raspored brzine po dubini toka i odgovarajuća srednja brzina (na odstojanju $0,4h$ od dna)

c) Lokalna vrednost tangencijalnog napona u osovini toka (Slika 2.1) iznosi: $\tau_o = 1,4$ Pa, a vrednost odgovarajuće smičuće brzine je: $u_* = 0,037$ m/s. Lokalna vrednost smičućeg Reynoldsovog broja je: $Re_* = u_* k_s / \nu = 374 > 70$, što ukazuje na oblast „hidraulički rapavog dna” ($B=8,5$ na Slici 2). Za ovu oblast važi teorijski raspored brzine u vidu logaritamske funkcije (lit. [1], tačka 2.6, str. 41):

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{k_s} \right) + 8,5 = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{30z}{k_s} \right) \text{ ili } 5,75 \cdot \log \left(\frac{30z}{k_s} \right), \quad (3)$$

gde je z – vertikalno odstojanje od dna, u_* – lokalna smičuća brzina, a $\kappa = 0,4$ – fon Karmanova „konstanta”. Primenom izraza (3), sračunate su lokalne vrednosti brzine (Tabela 2.1), na osnovu kojih je nacrtan dijagram na Slici 2.2.

Tabela 2.1

z	u
[m]	[m/s]
0.00	0.00
0.01	0.35
0.05	0.47
0.10	0.53
0.20	0.60
0.28	0.63
0.42	0.67
0.56	0.69
0.70	0.72
0.84	0.73
0.98	0.75
1.12	0.76
1.26	0.77
1.40	0.78

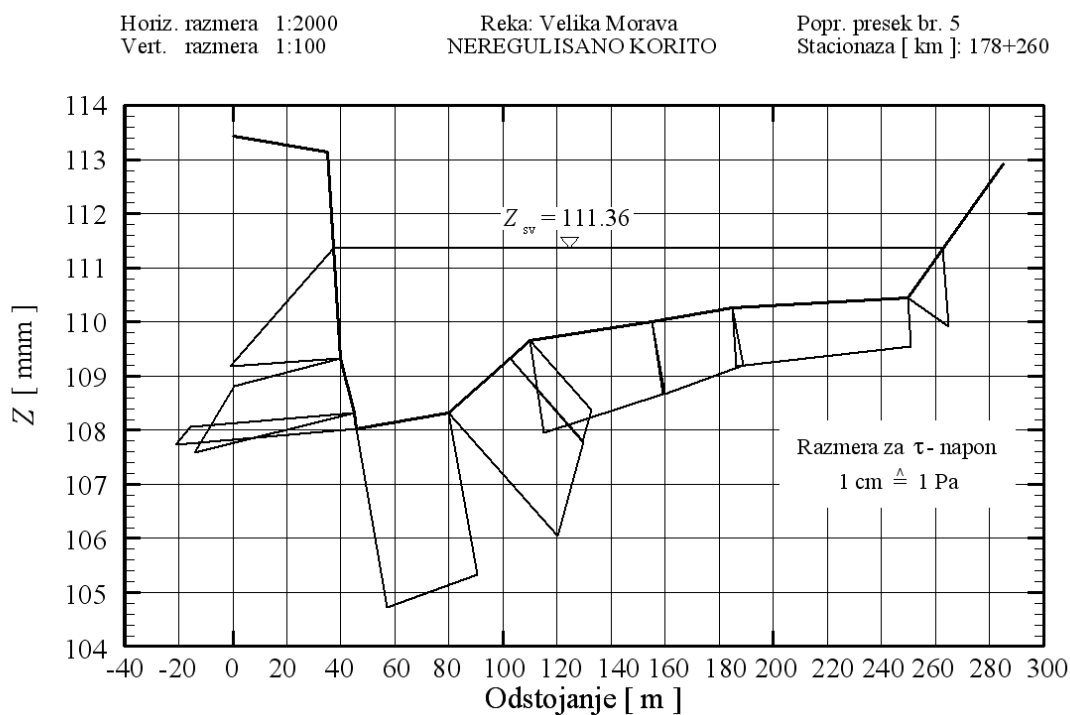
Tabela 2.2

y	Z_d	h	τ_0
[m]	[mm]	[m]	[Pa]
0.0	113.44	-	-
35.0	113.15	-	-
40.0	109.32	2.04	2.04
45.0	108.32	3.04	3.04
45.5	108.02	3.34	3.34
80.0	108.32	3.04	3.04
102.5	109.32	2.04	2.04
110.0	109.65	1.71	1.71
155.0	110.00	1.36	1.36
185.0	110.27	1.09	1.09
250.0	110.45	0.91	0.91
285.0	112.93	-	-

d) Teorijska vrednost srednje brzine po dubini jednaka je (lit. [1], tačka 2.9, str. 46):

$$\tilde{u} = u_* \cdot 5,75 \log \left(12 \frac{h}{k_s} \right) = 0,69 \text{ m/s.}$$

e) Na Slici 2.3 prikazan je raspored tangencijalnog napona po okvašenom obimu. Da bi se ovaj dijagram konstruisao, neophodno je sračunati lokalne vrednosti tangencijalnog napona u nizu izabranih vertikala: $\tau_{0,j} = \rho \cdot g \cdot h_j \cdot I_e$, gde indeks $j = 1, 2, \dots$ označava broj vertikale (Slika 2.1). Rezultati proračuna dati su u Tabeli 2.2.



Slika 2.3: Raspored tangencijalnog napona po okvašenom obimu

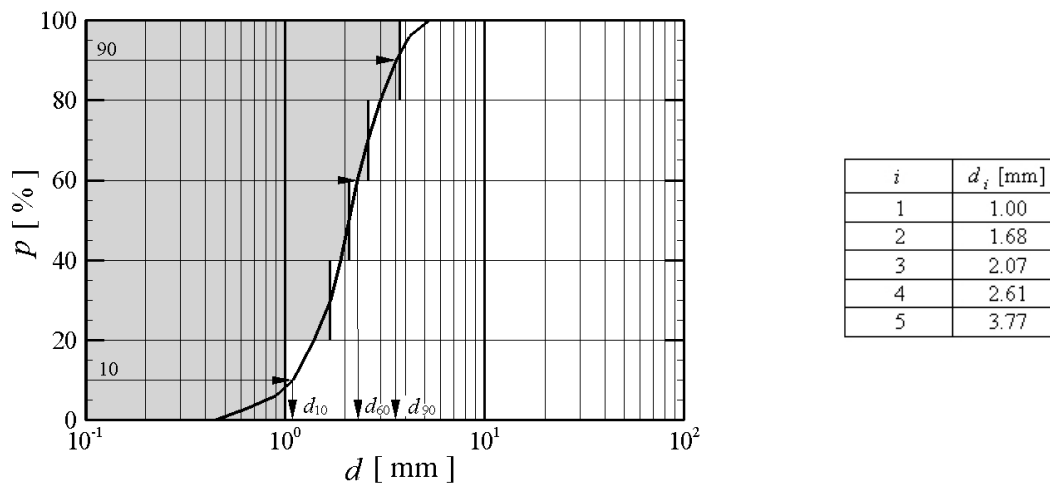
Vežba br. 3

Rešavanje se obavlja u nekoliko koraka.

(1) Granulometrijska kriva. Ova kriva, prikazana na Slici 3.1, predstavlja empirijsku raspodelu krupnoće nanosa. Sa ove krive, koja se zove i „kriva zastupljenosti“ prečnika zrna, može se očitati niz karakterističnih prečnika, na primer: $d_{10} = 1,1$ mm, $d_{60} = 2,3$ mm i $d_{90} = 3,6$ mm. (Indeks označava koliko je procentualno sitnijih zrna.) Karakteristični prečnici se koriste u razne svrhe. Na primer, koeficijent uniformnosti granulometrijskog sastava definiše se kao: $S_u = d_{60}/d_{10} = 2,3/1,1 = 2,09$, a Maningov koeficijent rapavosti: $n_r = d_{90}^{1/6}/26 = 0,0036^{1/6}/26 = 0,015 \text{ m}^{-1/3}_s$.

U proračunima vučenog nanosa granulometrijska kriva se obično aproksimira histogramom (Slika 3.1). U ovom slučaju je usvojeno 5 jednakih klasnih intervala $\Delta p = 20\%$, odnosno 5 frakcija ($i = 1, 2, \dots, 5$). Svakoj frakciji odgovara jedan prečnik zrna. Srednji prečnik (koji se koristi u modelu MPM) računa se na sledeći način:

$$d_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^5 d_i \cdot \Delta p_i}{\sum_{i=1}^5 \Delta p_i} = \frac{\sum_{i=1}^5 d_i \cdot \Delta p_i}{100} = \frac{1,0 \cdot 20 + 1,68 \cdot 20 + \dots + 3,77 \cdot 20}{100} = 2,2 \text{ mm.}$$



Slika 3.1: Granulometrija vučenog nanosa i njena podela na frakcije

(2) Kalibracija parametara modela MPM. Metoda za proračun pronosa vučenog nanosa MPM zasnovana je na bezdimenzionom izrazu (lit. [1], tačka 10.3.2, str. 264 i primer 10.2, str. 267):

$$k_0 \cdot \Theta = a \cdot \Phi^{2/3} + b,$$

koji daje vezu između bezdimenzionog tangencijalnog napona Θ i bezdimenzionog pronosa vučenog nanosa Φ . Parametar k_0 je korekcionni faktor tangencijalnog napona. Dati izraz pokazuje da je veza između veličina $k_0 \cdot \Theta$ i $\Phi^{2/3}$ linearna. Reč je o pravoj čiji je nagib „ a “, a odsečak na ordinati „ b “. Odsečak b jednak je kritičnom bezdimenzionom tangencijalnom naponu Θ_c , pri kome dolazi do pokretanja vučenog nanosa.

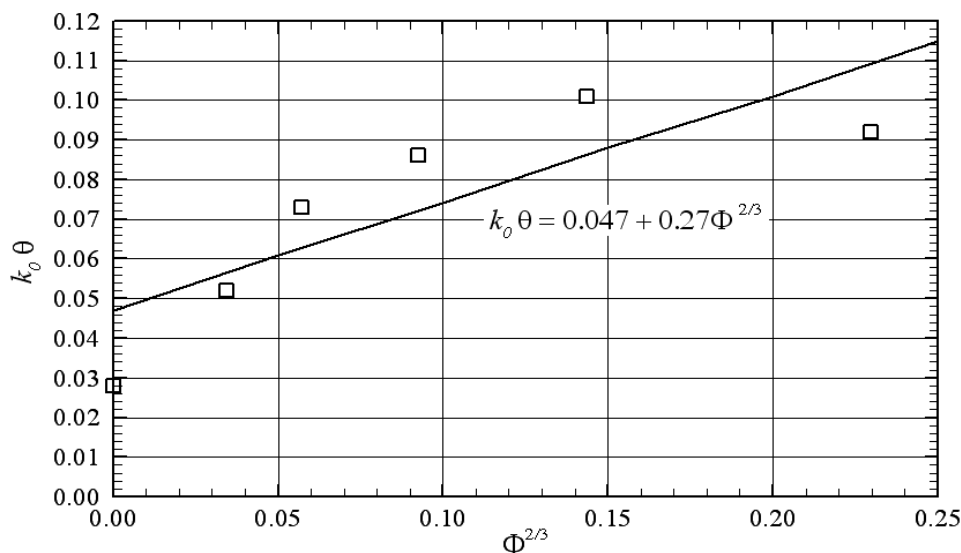
Proračun veličina $k_0 \cdot \Theta$ i $\Phi^{2/3}$ prikazan je u Tabelama 3.1 i 3.2. U proračunu se koriste podaci dati za profil br. 24, koji se nalazi na uzvodnom kraju razmatrane deonice. Rezultati su grafički prikazani na Slici 3.2.

Tabela 3.1

Q	R_{st}	$I_{e_{\text{st}}}$	τ_0	θ	n	k_0	$k_0\theta$
[m ³ /s]	[m]	[l]	[Pa]	[l]	[m ^{-1/3} s]	[l]	[l]
77	1.58	0.000261	4.0	0.114	0.038	0.249	0.028
180	1.75	0.000332	5.7	0.160	0.032	0.323	0.052
300	1.97	0.000342	6.6	0.186	0.028	0.394	0.073
400	2.25	0.000334	7.4	0.207	0.027	0.416	0.086
500	2.46	0.000339	8.2	0.230	0.026	0.441	0.101
623	2.12	0.000317	6.6	0.185	0.024	0.497	0.092

Tabela 3.2

Q	q_{vr}	q'_{vr}	$\Phi^{2/3}$
[m ³ /s]	[kg/sm ³]	[N/sm ³]	[l]
77	0.000	0.000	0.0000
180	0.007	0.043	0.0343
300	0.015	0.092	0.0571
400	0.031	0.189	0.0926
500	0.060	0.366	0.1438
623	0.121	0.739	0.2296



Slika 3.2: Određivanje vrednosti parametara u formuli MPM

Može se konstatovati da je vrednost kritičnog tangencijalnog napona: $b = \Theta_c = 0,047$ (slučajno jednaka originalnoj – eksperimentalno određenoj vrednosti MPM), dok je nagib regresione prave: $a = 0,27$.

U dimenzionom izrazu MPM za proračun masenog pronosa vučenog nanosa:

$$q_{vm} = c_{mp}(\tau'_o - \tau_{oc})^{3/2} \quad (4)$$

figuriše konstanta c_{mp} , čija je vrednost u ovom slučaju:

$$c_{mp} = \frac{a^{-3/2}}{g \cdot \sqrt{\rho}} \left(\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \right) = \frac{0,27^{-3/2}}{9,81 \cdot \sqrt{1}} \left(\frac{2,65}{2,65 - 1,0} \right) = 1,17 \text{ s}^2(\text{m/t})^{1/2}.$$

Vrednost kritičnog tangencijalnog napona iznosi:

$$\tau_{oc} = \Theta_c \cdot g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot d_{sr} = 0,047 \cdot 9,81 \cdot (2,65 - 1,00) \cdot 0,0022 = 0,00167 \text{ kPa, ili } 1,67 \text{ Pa.}$$

(3) Proračun dnevnog pronosa vučenog nanosa. Proračun se obavlja za nekoliko protoka: Q_{mv} , Q_{sv} i Q_{svv} , kao i za proizvoljno izabrane vrednosti: $Q = 300, 400$ i $500 \text{ m}^3/\text{s}$. U Tabeli 3.3 prikazan je proračun za protok $Q_{svv} = 624 \text{ m}^3/\text{s}$.

Objašnjenje Tabele 3.3:

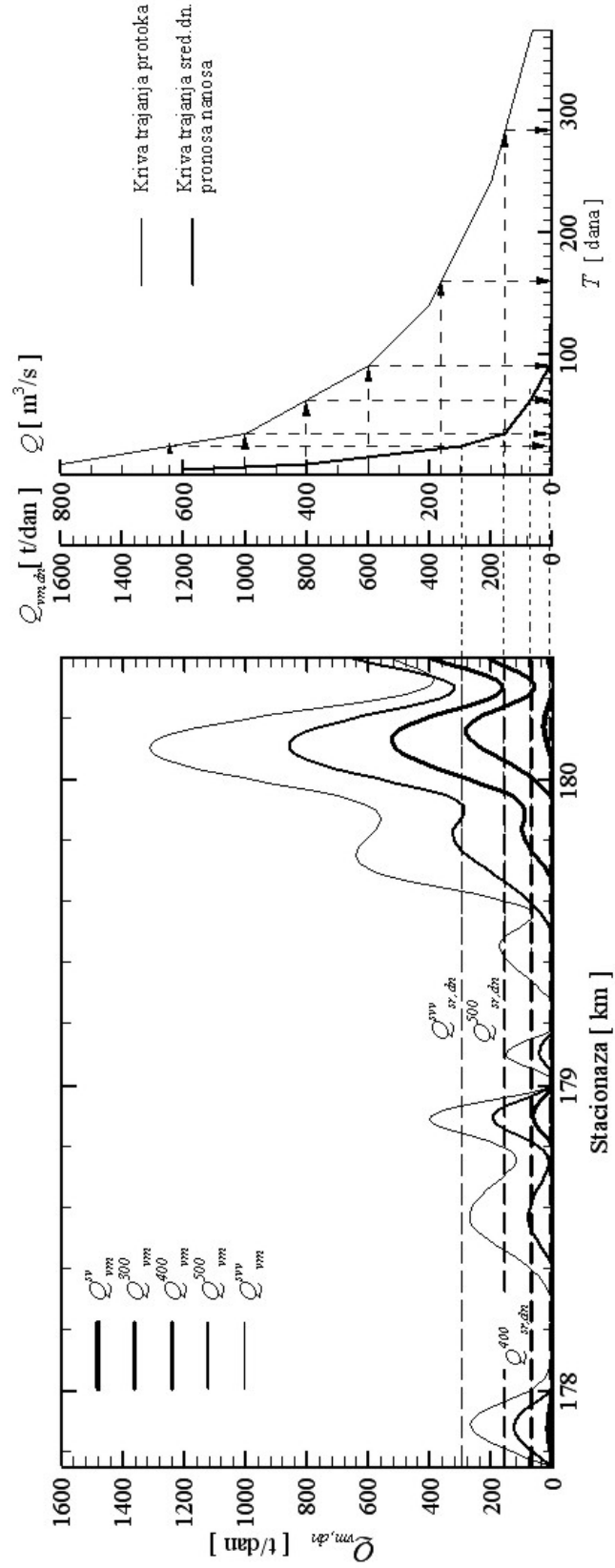
U kolone A–F kopiraju se podaci o profilima i rezultatima hidrauličkog proračuna (Vežba br. 1): broj profila (kolona A), stacionaža (kolona B), kote nivoa pri datom protoku (kolona C), vrednosti hidrauličkog radijusa (kolona E) i vrednosti nagiba linije energije (kolona F). Kolona D sadrži podatke o širini vodnog ogledala pri maloj vodi $B(Q_{mv})$. U cilju uprošćenja proračuna, uvedene su sledeće pretpostavke: (i) širina $B(Q_{mv})$ je približno jednaka širini pojasa kretanja vučenog nanosa B_v (dužini okvašenog obima na kojoj je $\tau_o > \tau_{oc}$), (ii) vrednost B_v je ista za sve protoke i (iii) vrednost korekcionog faktora tangencijalnog napona je: $Q_r/Q = 1$.

U koloni G računaju se vrednosti korigovanog tangencijalnog napona $k_0 \cdot \tau_o = (n_r/n)^{3/2} \cdot \tau_o$, u koloni H, vrednosti jediničnog masenog pronosa (suvog materijala) q_{vm} pomoću izraza (4), a u koloni I, vrednosti pronosa u poprečnom profilu: $Q_{vm} = q_{vm} \cdot B_v$ [t/s]. Vrednosti Q_{vm} , izražene u tonama na dan [t/dan] (kolona J), koriste se za crtanje uzdužnog dijagrama dnevnog pronosa vučenog nanosa na razmatranoj deonici (zavisnost $Q_{vm}(x)$ na Slici 3.3). *Prosečni dnevni pronos nanosa pri datom protoku dobija se tako što se površina ispod odgovarajućeg dijagrama, određena trapeznim pravilom, podeli sa dužinom deonice.* (Ovo treba uraditi za sve računске protoke, kao što je prikazano na Slici 3.3.)

(4) Proračun prosečnog godišnjeg pronosa u profilu. Zbog različitih vremenskih razmera hidroloških i morfoloških ciklusa, koristi se heuristički pristup po kome se *prosečni pronos kroz posmatrani poprečni profil deonice u određenom periodu, može izjednačiti sa prosečnim transportnim kapacitetom na toj deonici, u jednom trenutku* (lit. [1], tačka 14.4.1, str. 431–433, primer 14.5). To zahteva da se za dati profil (br. 24) konstruiše *kriva trajanja pronosa nanosa* pomoću zadate krive trajanja protoka. Ovo se obavlja tako što se vrednosti prosečnog dnevnog pronosa na deonici, određene za više računskih protoka, „povežu” sa trajanjima tih protoka (Slika 3.3). Prosečni godišnji pronos nanosa u datom profilu dobija se kao površina ispod krive trajanja pronosa nanosa. U konkretnom primeru, prosečni godišnji pronos u profilu br. 24 iznosi oko 24100 t.

Tabela 3.3

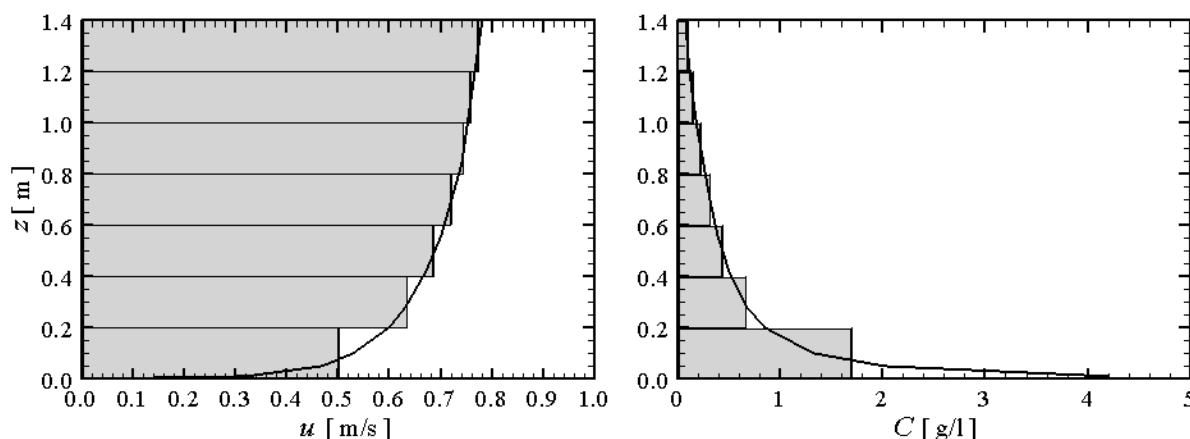
1	ρ [kg/m ³] =	1000	Q [m ³ /s] =	623	n [m ^{-1/3} /s] =	0.024	a =	0.047			
2	ρ_s [kg/m ³] =	2650	Q_v [m ³ /s] =	623	n_r [m ^{-1/3} /s] =	0.015	b =	0.272			
3	g [m/s ²] =	9.81	Q_v/Q [/] =	1.00	$(n_r/n)^{3/2}$ [/] =	0.494	c_{MPM} =	1.15			
4	d [mm] =	2.2					τ_{cr} [kPa] =	1.67E-03			
5											
6	Profil	Stac.	Z	B_v	R	I_E	τ_0'	q_{vm}	Q_{vm}	$Q_{vm,dn}$	$Q_{vm,dn}\Delta L$
7	[/]	[km]	[mm]	[m]	[m]	[/]	[kPa]	[t/(s m)]	[t/s]	[t/dan]	[t/(dan m)]
8	1	177.750	112.650	178.51	2.18	0.000117	1.24E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0	
9	2	177.905	112.660	110.03	2.41	0.000214	2.50E-03	2.7E-05	3.0E-03	260.6	20192.67
10	3	178.005	112.690	138.31	2.35	0.000172	1.96E-03	5.6E-06	7.7E-04	66.5	16354.82
11	4	178.105	112.710	137.52	2.36	0.000153	1.75E-03	7.7E-07	1.1E-04	9.2	3786.36
12	5	178.260	112.740	212.72	2.82	0.000114	1.56E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0	711.56
13	6	178.405	112.750	171.65	2.62	0.000154	1.96E-03	5.5E-06	9.4E-04	81.1	5878.10
14	7	178.550	112.770	153.84	2.66	0.000182	2.35E-03	2.0E-05	3.1E-03	267.8	25292.21
15	8	178.700	112.790	116.23	2.80	0.000166	2.25E-03	1.6E-05	1.9E-03	161.6	32202.67
16	9	178.800	112.810	94.39	2.56	0.000190	2.36E-03	2.1E-05	1.9E-03	168.4	16497.58
17	10	178.900	112.820	96.58	2.71	0.000218	2.86E-03	4.7E-05	4.6E-03	395.3	28183.04
18	11	179.000	112.870	145.10	3.18	0.000099	1.53E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0	19764.86
19	12	179.095	112.870	109.69	2.64	0.000176	2.25E-03	1.6E-05	1.8E-03	152.2	7229.02
20	13	179.180	112.900	188.01	3.43	0.000081	1.35E-03	0.0E+00	0.0E+00	0.0	6468.07
21	14	179.280	112.910	157.50	2.99	0.000119	1.72E-03	4.2E-07	6.6E-05	5.7	285.92
22	15	179.380	112.910	122.13	2.99	0.000147	2.13E-03	1.1E-05	1.4E-03	118.9	6230.61
23	16	179.485	112.930	154.43	3.51	0.000126	2.14E-03	1.2E-05	1.8E-03	156.9	14480.11
24	17	179.580	112.930	146.78	2.88	0.000143	2.00E-03	6.7E-06	9.8E-04	84.8	11481.38
25	18	179.680	112.940	134.43	3.22	0.000181	2.83E-03	4.5E-05	6.1E-03	523.7	30423.39
26	19	179.840	112.960	93.13	3.32	0.000201	3.23E-03	7.1E-05	6.6E-03	572.7	87709.07
27	20	179.930	112.980	84.45	3.29	0.000218	3.48E-03	8.8E-05	7.5E-03	644.6	54777.25
28	21	180.050	113.010	92.59	2.43	0.000362	4.26E-03	1.5E-04	1.4E-02	1217.1	111698.75
29	22	180.180	113.050	70.75	2.55	0.000371	4.59E-03	1.8E-04	1.3E-02	1108.6	151166.46
30	23	180.295	113.120	84.31	2.46	0.000255	3.04E-03	5.8E-05	4.9E-03	424.9	88173.32
31	24	180.395	113.130	83.83	2.12	0.000317	3.26E-03	7.3E-05	6.1E-03	526.9	47587.62
32										Σ =	786574.82
33	Prosečni dnevni pronos na deonici [t/dan]:				297.4						



Slika 3.3: Godišnji pronos vučenog nanosa u profilu br. 24

Vežba br. 4

U Tabeli 4.1 dati su rezultati merenja lokalne brzine u vertikali iz Vežbe br. 2 (osovina toka pri Q_{sv}), a na Slici 4.1 dat je grafički prikaz rasporeda brzine po dubini $u(z)$. Koristeći podatak iz Vežbe br. 2 da je vrednost lokalne smičuće brzine $u_* = 0,037$ m/s, da je vrednost zadate referentne koncentracije $C_a = 4,2$ gr/l i da zatom prečniku zrna odgovara brzina tonjenja $W = 0,0084$ m/s, najpre je sračunata vrednost parametra u Rausovom izrazu: $Z^* = W/(\kappa \cdot u_*) = 0,57$, a zatim, pomoću ovog izraza (lit. [1], tačka 11.3, str. 311–313), teorijski raspored koncentracije suspendovanog nanosa po dubini toka $C(z)$ (Tabela 4.1). Odgovarajući grafički prikaz dat je na Slici 4.1.



Slika 4.1: Raspored po dubini toka: brzine (levo) i koncentracije suspendovanog nanosa (desno)

Jedinični maseni pronos suspendovanog nanosa u datoj vertikali, jednak je po definiciji (lit. [1], tačka 11.5, str. 319):

$$q_{sm} = \rho \cdot \int_{\delta_o}^h C(z) \cdot u(z) dz \approx \rho \cdot \sum_{i=1}^M u_{sr,i} \cdot C_{sr,i} \cdot \Delta z,$$

gde indeks $i = 1, 2, \dots, M$ označava broj računskih intervala po vertikali, a u_{sr} i C_{sr} su srednje vrednosti u intervalu. Radi se o numeričkoj integraciji primenom trapeznog pravila. U konkretnom slučaju, račun je sproveden sa $M = 7$ intervala (Tabela 4.2) i konačan rezultat iznosi: $q_{sm} = 0,433$ kg/(s m).

Tabela 4.1

z [m]	u [m/s]	C [g/l]
0.00	0.00	∞
0.01	0.35	4.20
0.05	0.47	2.01
0.10	0.53	1.33
0.20	0.60	0.85
0.28	0.63	0.68
0.42	0.67	0.5
0.56	0.69	0.39
0.70	0.72	0.31
0.84	0.73	0.25
0.98	0.75	0.19
1.12	0.76	0.14
1.26	0.77	0.09
1.40	0.78	0.00

Tabela 4.2

interval od - do	Δz	u_{sr}	C_{sr}	$u_{sr} \cdot C_{sr}$	Δq_{sm}
[m + m]	[m]	[m/s]	[g/l]	[kg/(m ² s)]	[kg/(m·s)]
0-0.2	0.2	0.5	1.70	0.850	0.170
0.2-0.4		0.63	0.67	0.422	0.084
0.4-0.6		0.69	0.44	0.304	0.061
0.6-0.8		0.72	0.32	0.230	0.046
0.8-1.0		0.74	0.23	0.170	0.034
1.0-1.2		0.76	0.15	0.114	0.023
1.2-1.4		0.77	0.10	0.077	0.015
				$\Sigma =$	0.433

Vežba br. 5

U Tabeli 5.1 dati su rezultati bilansiranja vučenog nanosa od profila do profila, na razmatranoj deonici, pri čemu su korišćene vrednosti transportnog kapaciteta sračunate u Vežbi br. 3.

Tabela 5.1

Δx	r.br. profila	$Q_{vm, ulaz}$	$Q_{vm, izlaz}$	ΔA_d	priroda deformacije
[m]	-	[t/dan]	[t/dan]	[m ²]	[/]
/	24	/	526.9	/	/
465	20	526.9	644.6	-3.98	erozija
350	17	644.6	84.8	25.15	zasipanje
300	14	84.8	5.7	4.14	zasipanje
480	9	5.7	168.4	-5.33	erozija
540	5	168.4	0.0	4.90	zasipanje
510	1	0.0	0.0	0.00	nema deformacije

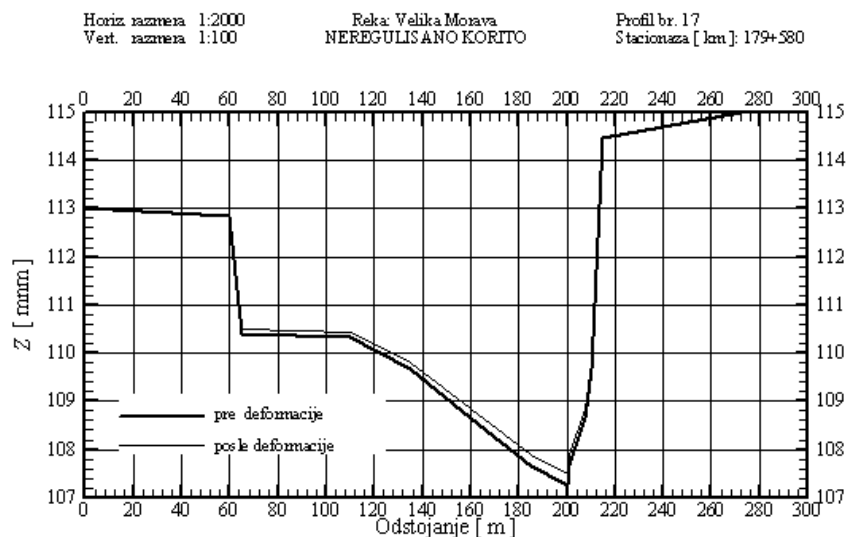
Tabela 5.2

tačka	y	z_{dj}	h_j	Δz_{dj}	z_j^{kor}
-	[m]	[mmm]	[m]	[m]	[mmm]
1	0.0	113.00	0.00	0.000	113.000
2	60.0	112.85	0.08	0.003	112.853
3	65.0	110.40	2.53	0.107	110.507
4	110.0	110.32	2.61	0.110	110.430
5	135.0	109.66	3.27	0.138	109.798
6	160.0	108.66	4.27	0.180	108.840
7	185.0	107.66	5.27	0.223	107.883
8	200.0	107.26	5.67	0.239	107.499
9	201.0	107.66	5.27	0.223	107.883
10	207.5	108.66	4.27	0.180	108.840
11	210.0	109.66	3.27	0.138	109.798
12	215.0	114.46	0.00	0.000	114.460
13	272.5	115.00	0.00	0.000	115.000

Korigovanje geometrije profila prikazano je na primeru profila br. 17. Vertikalno pomeranje tačke dna (Δz_d) računa se proporcionalno dubini (lit. [1], tačka 12.2.1.5, str. 366, primer 12.3):

$$(\Delta z_d)_j = h_j \cdot \frac{\Delta A_d}{A},$$

gde je j – broj vertikale, h – dužina vertikale, ΔA_d – deformaciona površina u profilu, a A – površina vode u poprečnom profilu. Rezultat proračuna prikazan je na Slici 5.1.



Slika 5.1: Opšta deformacija korita

Vežba br. 6

Vrednosti širine vodnog ogleđala u poprečnim profilima, sračunate za protok srednje vode Q_{sv} , date su u Tabeli 6.1. Statističkom analizom prostorne serije $B(x)$, čiji je grafički prikaz dat

Tabela 6.1

Profil	1	2	3	4	5	6	7
Stacionaža [km]	177.750	177.905	178.005	178.105	178.260	178.405	178.550
B [m]	207.03	175.23	190.54	229.88	225.81	220.83	180.22
Profil	8	9	10	11	12	13	14
Stacionaža [km]	178.700	178.800	178.900	179.000	179.095	179.180	179.280
B [m]	147.41	182.82	129.17	213.07	216.75	199.59	169.84
Profil	15	16	17	18	19	20	21
Stacionaža [km]	179.380	179.485	179.580	179.680	179.840	179.930	180.050
B [m]	165.97	157.53	149.33	136.75	119.76	122.87	112.2
Profil	22	23	24				
Stacionaža [km]	180.180	180.295	180.395				
B [m]	113.45	143.69	125.96				

na Slici 6.1, potrebno je odrediti srednju širinu (zastupljenosti 50%), na osnovu koje se usvaja projektna širina regulisanog korita – „regulaciona širina” B_r (lit. [1], tačka 14.3, str. 422–426, primer 14.3). Podelom na 5 klasnih intervala, konstruisane su krive zastupljenosti i učestalosti širina vodnog ogleđala pri Q_{sv} , kao što je prikazano u Tabelama 6.2 i 6.3 i na Slici 6.1.

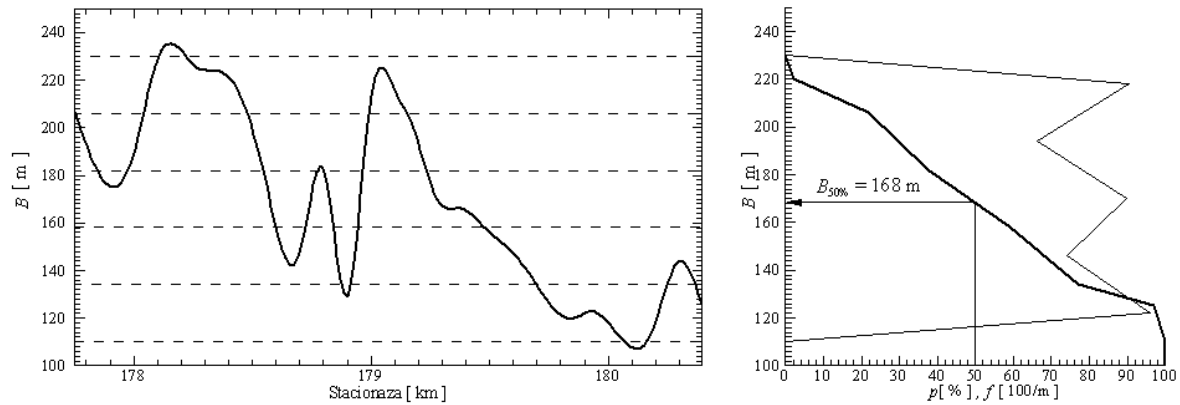
Širina vodnog ogleđala zastupljenosti 50% iznosi: $B_{50\%} = 168$ m. Može se usvojiti regulaciona širina $B_r = 170$ m. Primenjena statistička analiza ima smisla samo ako je vodotok u svom prirodnom režimu (nije kanalisani).

Tabela 6.2

B [m]	p [%]	klasa	B [m]	Δp [%]
110	100.00	1	110-134	23.06
134	76.94	2	135-158	17.77
158	59.17	3	159-182	21.55
182	37.62	4	183-206	15.88
206	21.74	5	207-230	21.74
230	0.00			

Tabela 6.3

B_v [m]	f [100×1/m]
110	0.00
122	0.96
146	0.74
170	0.90
194	0.66
218	0.91
230	0.00



Slika 6.1: Promena širine vodnog ogledala duž toka pri Q_{sv} (levo) i krive zastupljenosti i učestalosti širina (desno)

Vežba br. 7

Razmatraju se dve varijante projektovanja regulisanog korita: po postojećoj trasi i prosecanjem krivine.

Varijanta I: očuvanje postojeće trase

(1) Iz rezultata hidrauličkog proračuna za merodavni protok Q_{sv} , u svakom računskom profilu se očitava širina vodnog ogledala. Te širine se zatim „prenose” na situaciju i na njoj definišu tačke ureza vodnog ogledala i rečnog korita. Povezivanjem ovih tačaka, dobijaju se *linije ureza* vodnog ogledala duž leve i desne obale. Te linije su merodavne za trasiranje regulisanog korita, izbor tipa regulacionih gradjevina i određivanje njihovog položaja u rečnom koritu.

(2) Vizuelno se određuju granice krivina, vodeći računa da će krivine regulisanog korita biti predstavljene kružnim lukovima. Pri tome se, u cilju smanjenja obima radova, *u krivinama kao merodavna uzima linija visoke, konkavne obale*. Poželjno je da je krivina regulisanog korita „prosta”, što znači da je opisana jednim kružnim lukom i jednim poluprečnikom. Ukoliko to nije moguće, krivina je „složena” i opisuje se pomoću više povezanih kružnih lukova, sa više poluprečnika. U primeru na Slici 7.1, sve krivine su „proste”.

(3) Za svaku krivinu se probanjem određuje: dužina poluprečnika R_k , položaj centra C (koordinate x, y) i centralni ugao α . Ovo se može raditi ručno (pomoću šestara i lenjira), ili pomoću računara¹.

(4) Kada se za svaku krivinu definiše kružni luk duž konkavne obale (ili, ako je krivina složena, više povezanih lukova), povlači se regulaciona linija suprotne – konveksne obale, na odstojanju regulacione širine B_r . Ova linija se može naći unutar postojećeg korita, ili „unutar” obale. U prvom slučaju neopodno je korito suziti, a u drugom, proširiti.

(5) Povezivanje regulacionih linija susednih krivina obično zahteva njihovo dodatno malo pomeranje kako bi se postigao „gladak” prelaz iz jedne krivine u drugu. Nastojati da prelaz bude u jednom profilu („infleksija” za krivine suprotnog smera, ili „sifleksija” za krivine istog smera). U tom slučaju se centri susednih krivina nalaze na istoj pravoj. Duge pravolinijske deonice, kao nestabilne, treba, ako je moguće, izbegavati. Povezivanjem krivina i pravolinijskih deonica dolazi se do konture regulisanog korita širine B_r (crvene regulacione linije na Slici 7.1).

(6) Iz uzajamnog odnosa linija ureza i regulacionih linija, proizilazi tip i položaj regulacionih gradjevina. Na deonici u krivini, gde se regulaciona linija približno poklapa sa linijom visoke, konkavne obale, postavlja se obaloutvrda kao gradjevina koja ima zadatak da zaštiti obalu od erozije.

Ako regulaciona linija „padne” unutar korita definisanog linijama ureza, korito treba suziti. U tom slučaju, duž konkavne obale u krivinama ili na dužim pravolinijskim deonicama, primenjuje se prava paralelna gradjevina (skraćeno „ppg”), kao prelazno rešenje do izgradnje obaloutvrde. Za suženje korita, duž konveksne obale u krivinama i duž pravolinijskih deonica, primenjuje se sistem napera.

U slučaju da regulaciona linija „padne” van granica korita definisanog linijama ureza, korito treba iskopom proširiti. U zavisnosti od zapremine iskopa, dve su mogućnosti; kada je u pitanju značajna količina materijala, vrši se mašinski iskop na potrebnoj dužini, a kada je količina materijala relativno mala, ostavlja se da reka sama odnese višak materijala.

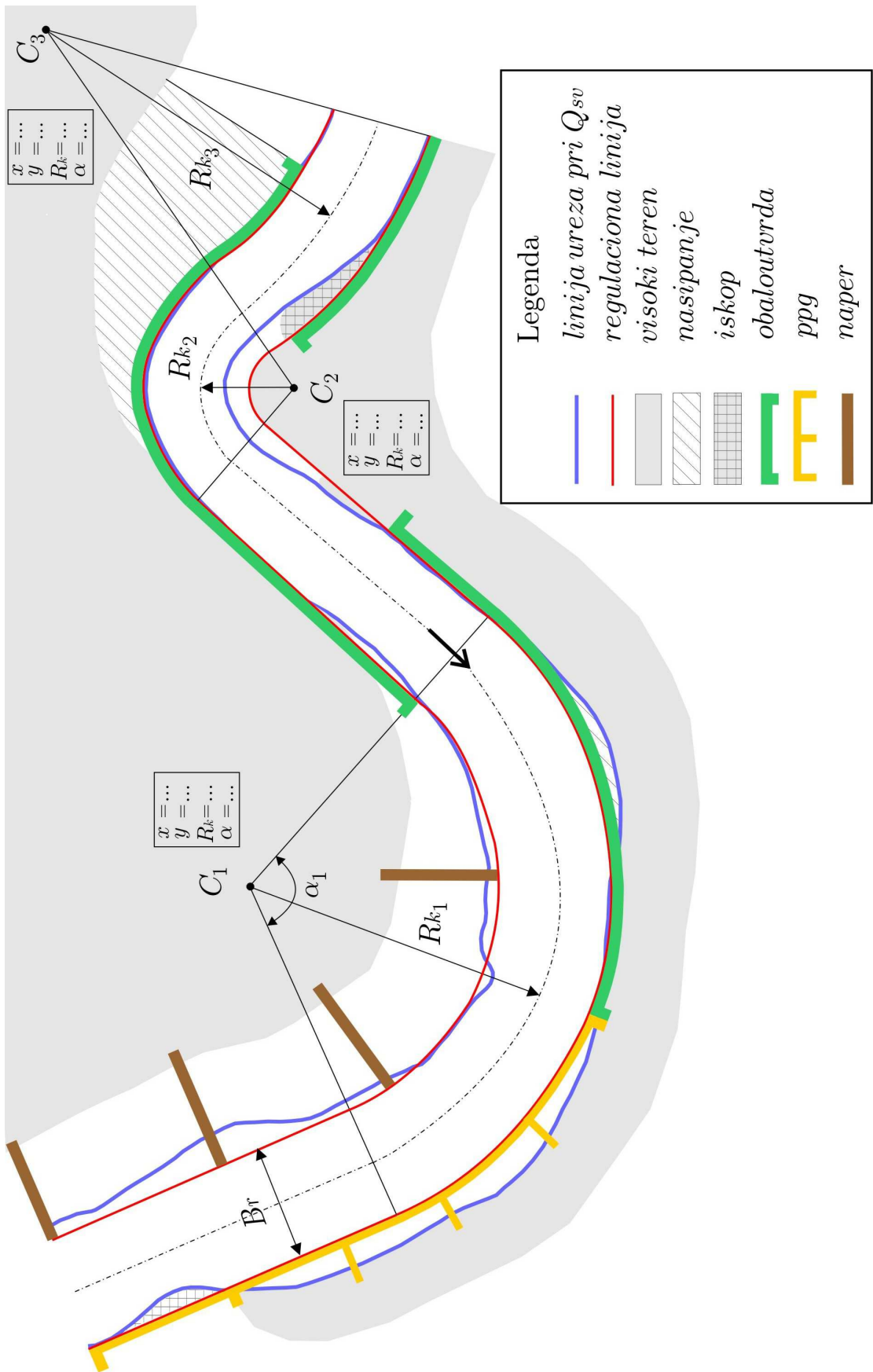
Na Slici 7.1 prikazana je skica regulacije korita po postojećoj trasi, kao ilustracija primene prethodno navedenih principa trasiranja.

Varijanta II: Prosecanje krivine

Oštre krivine sa malim poluprečnikom, predstavljaju prepreku za evakuaciju velikih voda i nanosa, a u slučaju plovnih reka, za plovidbu. Prosecanje oštih krivina ima za cilj da se poveća propusna moć za vodu i nanos, ili da se poboljšaju plovidbeni uslovi. Prosecanje krivina zahteva ispunjenje nekoliko uslova.

(1) Širina „proseka” – novog korita u krivini, treba da bude jednaka regulacionoj širini B_r . Poluprečnik prosečene krivine treba da bude usaglašen sa poluprečnicima uzvodne i nizvodne krivine (približno jednaki poluprečnici), a u slučaju plovnog vodotoka, treba da zadovolji navigacioni kriterijum: $R_{k,\min} \approx 6 \div 10 L_{pl}$. Centar prosečene krivine treba da bude na istoj pravoj kao centar uzvodne/nizvodne krivine.

¹Ako se radi ručno, centar krivine se može odrediti tako što se konkavna obala provizorno aproksimira kružnim lukom, pa se duž tog luka postavi nekoliko tačaka na jednakim odstojanjima. Spajanjem ovih tačaka dobijaju se tetive (najmanje 3 tačke i 2 tetive), a simetrale tetiva trebalo bi da se seku u centru kružne krivine. Da se dodje do konačnog položaja centra i dužine poluprečnika može zahtevati više pokušaja. Ako se radi pomoću računara, treba skeniranu situaciju u obliku raster fajla „uvući” u AutoCAD okruženje, pa primenom grafičke opcije „circle 3 pt” vizuelno odrediti koji kružni luk najbolje opisuje liniju konkavne obale; ostaje samo da se očitaju koordinate centra i dužina poluprečnika.



Slika 7.1: Skica regulacije korita po postojećoj trasi (Varijanta I)

(2) Novo korito u krivini – prosek, može se odmah iskopati u punom profilu, što se praktikuje kod plovnih vodotoka da bi se što više skratio zastoj u plovidbi. Ako reka nije plovna, prosek se ne mora kopati u punom profilu, već je dovoljno da se iskopa samo jedan njegov manji deo – rov, nazvan „kineta”, čija je širina proizvoljna, ali najmanje $1/10 B_r$. Kineta se kopa do kote nivoa podzemne vode, koja približno isnosi $1 \div 2$ m ispod nivoa male vode Z_{mv} .

Iskop kinete obavlja se sa nizvodnog kraja, uzvodno. Uvodni kraj se ostavlja neiskopan. Taj deo se naziva „čep” kinete. Kada je protok u reci dovoljno veliki, čep se probija i voda se upušta u kinetu. Pod uticajem kinetičke energije upuštene vode, dolazi do dubinske i bočne erozije kinete, tako da se prosek postepeno širi. Taj proces se zove „samorazrada proseka”. Brzina ovog procesa zavisi od protoka i karakteristika materijala u kome je kineta prokopana. Da bi se erozioni proces zaustavio unutar željenih granica, duž konkavne (spoljašnje) obale proseka unapred se gradi ukopana obaloutvrda, a duž konveksne (unutrašnje) obale, ukopana kamena deponija².

Na Slici 10.1 prikazana je skica regulacije korita prosecanjem oštre krivine na uzvodnom kraju date deonice. Poluprečnik novog korita u krivini – proseka, približno je jednak poluprečniku nizvode krivine i obezbeđuje „gladak” prelaz iz krivine u krivinu. Konkretni topografski uslovi nameću rešenje sa iskopom proseka u punom profilu (bez kinete) i nasipanjem starog – napuštenog korita.

Da bi se doneo zaključak koja je varijanta regulacije povoljnija, morala bi se razmotriti znatno duža deonica od one koja je prikazana na Slikama 7.1 i 7.2.

Vežba br. 8

Kao merodavan, izabran je profil br. 9 (km 179+200), u kome treba projektovati obaloutvrdu od kamenog nabačaja. Na osnovu hidrauličkog proračuna, u ovom profilu važe sledeće karakteristične kote nivoa: $Z_{svv} = 112,81$ mm, $Z_{sv} = 111,42$ mm, $Z_{mv} = 110,65$ mm. Kota dna po talvegu iznosi: $z_d = 107,22$ mm. Protok koji ispunjava glavno korito je protok srednje velike vode: $Q_{svv} = 623$ m³/s. Odgovarajući nagib linije energije je: $I_e = 0,00019$.

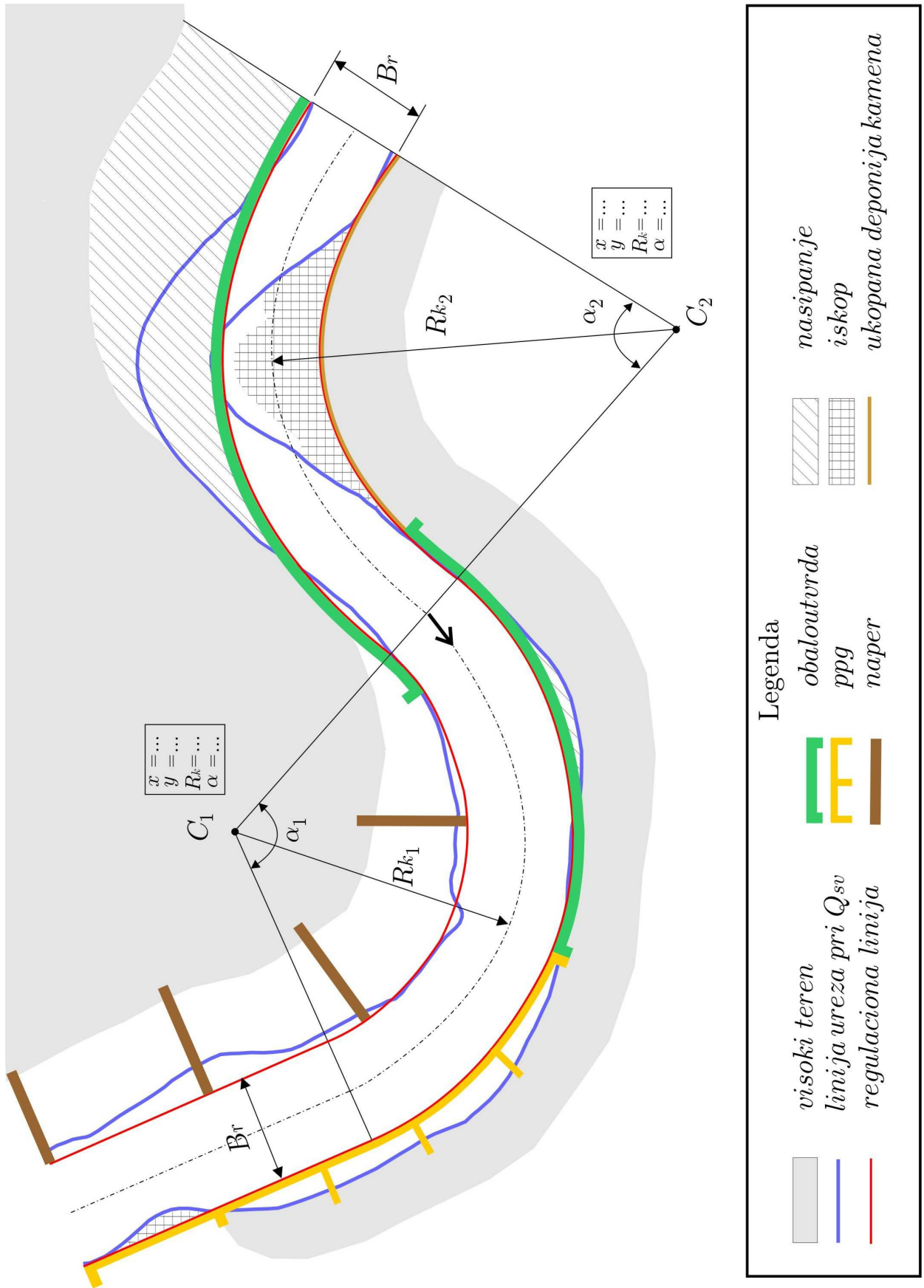
a) Krupnoća kamena obaloutvrde određiće se po kriterijumu kritične brzine. Za merodavnu kritičnu brzinu usvaja se najveća lokalna, po dubini osrednjena brzina pri Q_{svv} . Ta brzina se javlja na mestu najveće dubine (po talvegu): $h = Z_{svv} - z_d = 112,81 - 107,22 = 5,59$ m. Lokalna smičuća brzina na ovom mestu je:

$$u_* = \sqrt{g \cdot h \cdot I_e} = \sqrt{9,81 \cdot 5,59 \cdot 0,00019} = 0,1 \text{ m/s.}$$

Ako se na osnovu granulometrijske krive iz Vežbe br. 3 uzme da je apsolutna rapavost: $k_s \approx d_{90} = 3,6$ mm, sledi:

$$\tilde{u} = u_* \cdot 5,75 \log \left(12 \frac{h}{k_s} \right) = 0,1 \cdot 5,75 \log \left(12 \frac{5,59}{0,0036} \right) = 2,26 \text{ m/s.}$$

²Prosecanje krivina je regulaciona mera sa puno neizvesnosti, jer drastično utiče na lokalnu promenu hidrauličkih i psamoloških uslova (ubrzanje toka, povećanje tagencijalnog napona i pronosa nanosa). Posledice prosecanja mogu biti regresivna erozija korita uzvodno od proseka i zasipanje korita nizvodno od proseka. Zato sa prosecanjem treba biti obazriv, a samorazradu proseka neophodno je proveriti hidrauličkim proračunom (raspodela protoka na glavno korito i kinetu, propusna moć kinete za nanos itd.). U nekim slučajevima uputno je izvršiti i proveru pomoću fizičkog modela.



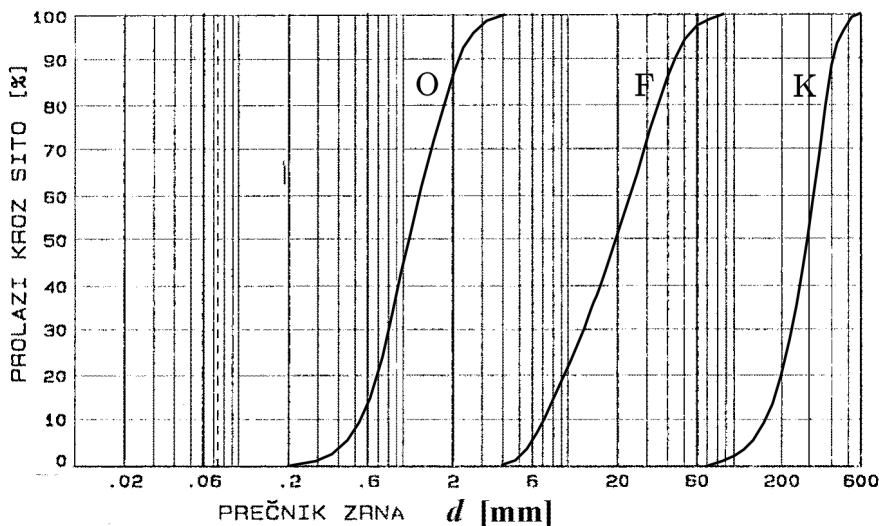
Slika 7.2: Skica regulacije korita prosecanjem krivine (Varijanta II)

Srednji prečnik kamena obaloutvrde iznosi:

$$d_{50}^K = 1,2 \frac{\tilde{u}^2}{2g} = 1,2 \frac{2,26^2}{2 \cdot 9,81} = 0,3 \text{ m.}$$

Gornja granica krupnoće kamena iznosi: $d_{50}^K \approx \tilde{u}^2/10 = 2,26^2/10 = 0,5 \text{ m}$. Usvaja se $d_{50}^K = 0,3 \text{ m}$.

Granulometrijska kriva obaloutvrde je usvojena shodno preporuci: $d_{\max}^K/d_{50}^K = d_{50}^K/d_{20}^K = 2$, pa je: $d_{\max}^K = 600 \text{ mm}$, a $d_{20}^K = 200 \text{ mm}$ (Slika 8.1). Za dalji proračun merodavan je i usvojeni prečnik $d_{15}^K = 180 \text{ mm}$.



Slika 8.1: Granulometrijske krive: O – tlo obale, F – peščani filter, K – kamena obaloutvrda

b) Na Slici 8.1 prikazana je zadata granulometrijska kriva tla obale (tzv. „baznog materijala”). Sa ove krive se mogu očitati sledeće karakteristične vrednosti:

$$\begin{aligned} d_{15}^O &= 0,63 \text{ mm} \\ d_{50}^O &= 1,20 \text{ mm} \\ d_{85}^O &= 2,00 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Odredjivanje granulometrijske krive peščanog filtra zasnovano je na primeni tri kriterijuma:

- (1) stabilnosti: $d_{15}^F \leq 5 \cdot d_{85}^O = 5 \cdot 2,00 = 10 \text{ mm}$; usvojeno: $d_{15}^F = 8 \text{ mm}$.
- (2) oblika zrna: $d_{50}^F \leq 25 \cdot d_{50}^O = 25 \cdot 1,20 = 30 \text{ mm}$; usvojeno: $d_{50}^F = 20 \text{ mm}$.
- (3) vodopropusnosti (kontrola): $d_{15}^F = (5 \div 40) d_{15}^O = 3 \div 25 \text{ mm}$; usvojena vrednost $d_{15}^F = 8 \text{ mm}$ zadovoljava ovaj kriterijum jer se nalazi u zahtevanom opsegu.

Na osnovu usvojenih vrednosti:

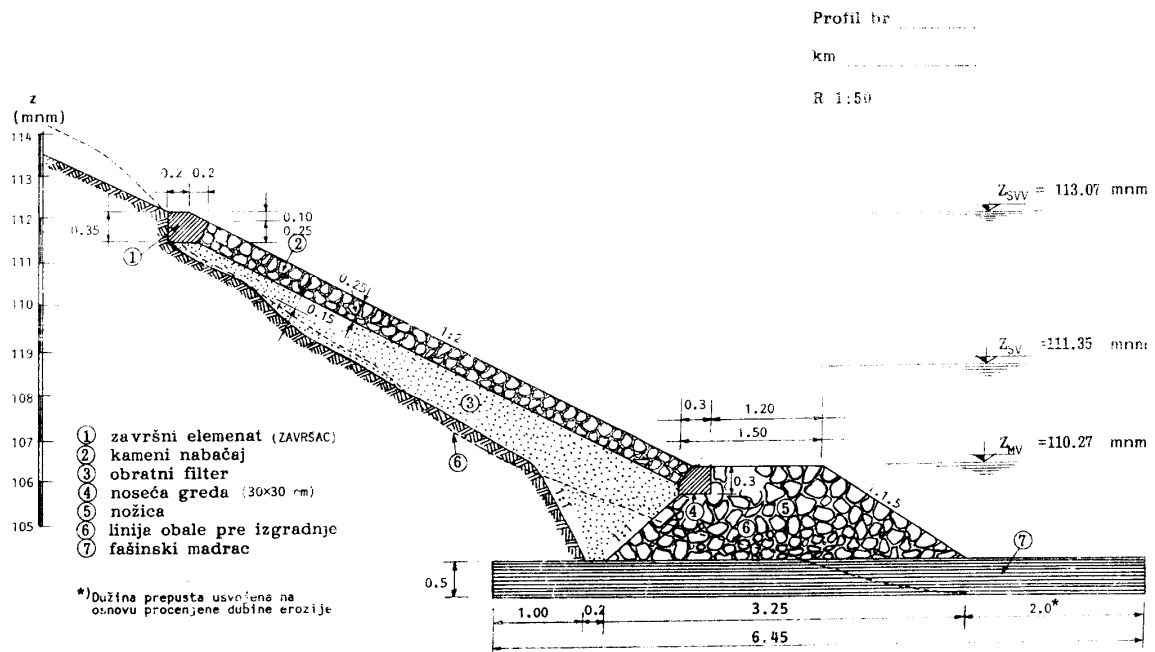
$$\begin{aligned} d_{15}^F &= 8 \text{ mm} \\ d_{50}^F &= 20 \text{ mm} \\ d_{85}^F &= 40 \text{ mm} \end{aligned}$$

nacrtna je granulometrijska kriva peščanog filtra na Slici 8.1. Položaj ove krive potvrđuje da se granulometrijska kriva peščanog filtra mora naći između granulometrijskih krivih tla obale i kamene obaloutvrde.

Kontrola odnosa usvojenog filtra i kamenog nabačaja pokazuje da su svi kriterijumi zadovoljeni:

- (1) $d_{15}^K/d_{85}^F = 180/40 = 4,5 < 5$;
- (2) $d_{50}^K/d_{50}^F = 300/20 = 15 < 25$;
- (3) $d_{15}^K/d_{15}^F = 180/8 = 22,5$ (u opsegu $5 \div 40$).

Na Slici 8.2 prikazan je primer obaloutvrde koji može poslužiti za rešavanje tački c) i d) ove vežbe.



Slika 8.2: Primer obaloutvrde od kamenog nabačaja

Vežba br. 9

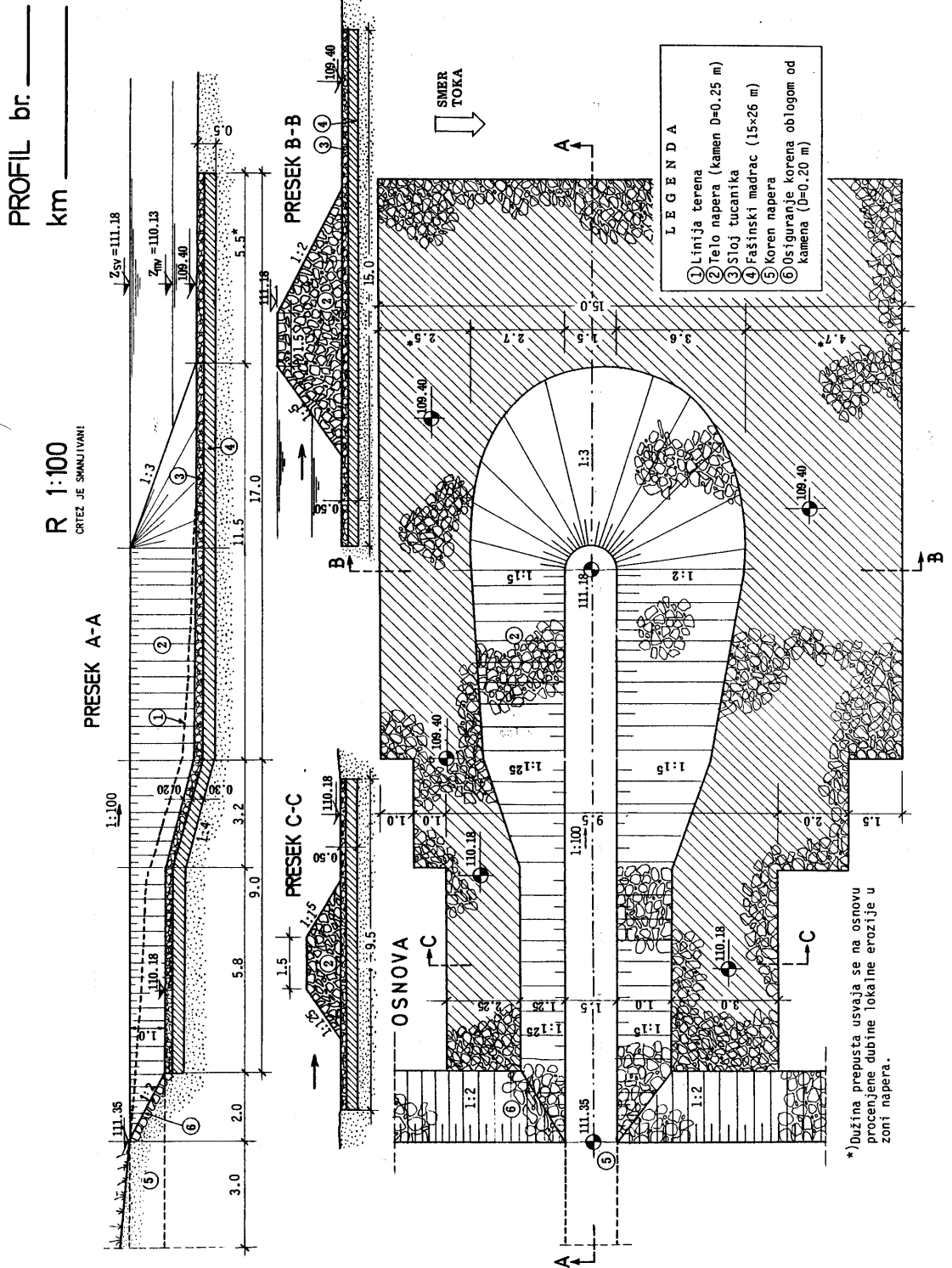
Ugledni primer za izradu ove vežbe dat je na Slici 9.1.

Vežba br. 10

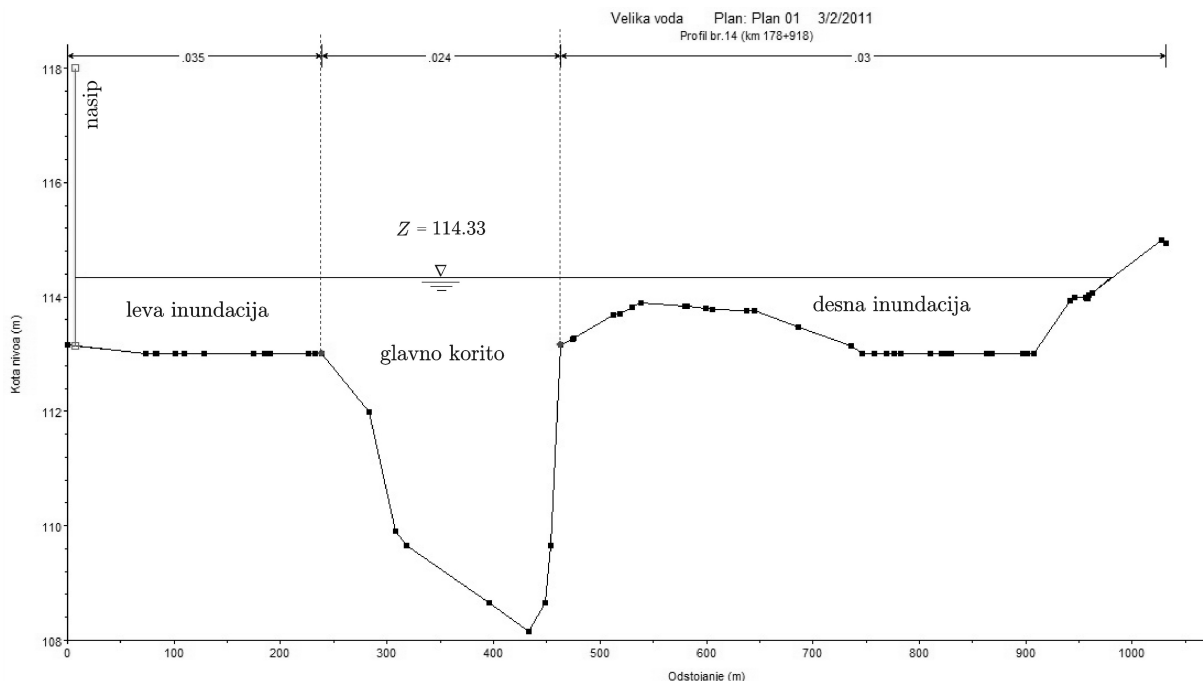
Način proračuna 100-godišnje velike vode opisan je u uputstvima za korišćenje programskog paketa HEC-RAS.

Na Slici 10.1 prikazan je profil br. 14 sa merodavnom kotom nivoa $Z = 114,33$ mm, a u Tabeli 10.1 dati su detalji proračuna podele protoka na glavno korito i na inundacije, pretpostavljajući da je linija nivoa horizontalna i da je nagib linije energije za glavno korito i inundacije, isti.

Može se konstatovati da je protok u inundacijama svega 9%, odnosno 13% ukupnog protoka od $2040 \text{ m}^3/\text{s}$. Brzina u glavnom koritu isnosi $1,7 \text{ m/s}$, u levoj inundaciji $0,52 \text{ m/s}$, a u desnoj, $0,47 \text{ m/s}$. Srednja profilaska brzina je: $V = 2040/1742,21 = 1,17 \text{ m/s}$.



Slika 9.1 Primer napera



Slika 10.1 Podela profila br. 14 na glavno korito i inundacije

Tabela 10.1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1			Z	A	R	n	K	I_E	Q
2			[mm]	[m ²]	[m]	[m ^{-1/3} s]	[m ² /s]	[J]	[m ³ /s]
3	leva inundacija		114.33	301.68	1.31	0.035	10319.52	0.000233	157.65
4	glavno korito			980.40	4.36	0.024	109022.56		1665.55
5	desna inundacija			460.13	0.89	0.030	14191.21		216.80
6			A =	1742.21		$\Sigma K_i =$	133533.28	Q =	2040.00
7									

Vrednost koeficijenta neravnomernosti brzine je:

$$\alpha = \frac{0,52^3 \cdot 301,68 + 1,7^3 \cdot 980,4 + 0,47^3 \cdot 460,13}{1,17^3 \cdot 1742,21} = 1,76,$$

a kota energije isnosi:

$$E = Z + \frac{\alpha \cdot V^2}{2g} = 114,33 + \frac{1,76 \cdot 1,17^2}{2 \cdot 9,81} = 114,45 \text{ mm}.$$

Literatura

- [1] Jovanović, M., *Regulacija reka – rečna hidraulika i morfologija*, drugo izmenjeno i dopunjeno izdanje, Gradjevinski fakultet, Beograd, 2008.