

# Hidrotehnički kanali

---

**Spahić, Amir**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:211825>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-05**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

AMIR SPAHIĆ

# **HIDROTEHNIČKI KANALI**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GRAĐEVINSKI FAKULTET

# HIDROTEHNIČKI KANALI

ZAVRŠNI RAD

**Student:** Amir Spahić

**Mentor:** prof. dr. sc. Eva Ocvirk

**Komentor:**

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Student/ica :

|                                |                       |
|--------------------------------|-----------------------|
| Amir Spahić<br>(Ime i prezime) | 0082059841<br>(JMBAG) |
|--------------------------------|-----------------------|

zadovoljio/la je na pisanom dijelu završnog ispita pod naslovom:

Hidrotehnički kanali  
(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

The Hydraulic Channels  
(Naslov teme završnog ispita na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio završnog ispita izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum: 17.09.2024.

Mentor: prof.dr.sc. Eva Ocvirk

Potpis mentora: Eva Ocvirk  
Digitally signed by Eva Ocvirk  
Date: 2024.09.17 10:59:05 +02'00'

Komentor:



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

OBRAZAC 2

## TEMA ZAVRŠNOG ISPITA

Ime i prezime studenta: **Amir Spahić**

JMBAG: **0082059841**

Završni ispit iz predmeta: **Hidrotehničke građevine**

|                                 |     |                               |
|---------------------------------|-----|-------------------------------|
| Naslov teme<br>završnog ispita: | HR  | <b>Hidrotehnički kanali</b>   |
|                                 | ENG | <b>The Hydraulic Channels</b> |

Opis teme završnog ispita:

Zadatak završnog rada je dati pregled i opis tipova hidrotehničkih kanala koji se izvode u sklopu hidrotehničkih sustava te prikazati osnove proračuna.  
Sadržaj rada:

1. Općenito o hidrotehničkim kanalima
2. Podjela kanala prema namjeni
3. Osnove proračuna
4. Primjer proračuna
5. Zaključak

Datum: **04.04.2024.**

Komentor: **Antonija Harasti**  
(Ime i prezime komentora)

Mentor: **prof.dr.sc. Eva Ocvirk**  
(Ime i prezime mentora)

(Potpis mentora)

# Sadržaj

|   |    |
|---|----|
| Sažetak .....   | 1  |
| 1. Općenito o hidrotehničkim kanalima.....                  | 3  |
| 1.1. Trasa kanala.....                                      | 4  |
| 1.2. Profil kanala.....                                     | 6  |
| 1.3. Uzdužni pad kanala, maksimalne i minimalne brzine..... | 10 |
| 1.4. Obloga kanala.....                                     | 12 |
| 1.5. Građevine na kanalima .....                            | 20 |
| 2. Hidrotehnički kanali prema namjeni.....                  | 22 |
| 2.1. Višenamjenski kanali .....                             | 22 |
| 2.2. Oteretni kanali.....                                   | 23 |
| 2.3. Kanali za navodnjavanje .....                          | 24 |
| 2.4. Odvodni kanali .....                                   | 26 |
| 2.5. Plovni kanali.....                                     | 27 |
| 2.6. Derivacijski kanali.....                               | 29 |
| 3. Osnove proračuna .....                                   | 33 |
| 3.1. Proračun tečenja u kanalu .....                        | 36 |
| 3.2. Specifična energija vodotoka .....                     | 39 |
| 3.3. Freudov broj .....                                     | 41 |
| 4. Primjer proračuna.....                                   | 43 |
| 5. Zaključak.....   | 47 |
| 6. Literatura.....  | 48 |
| 6.1. Popis izvora.....                                      | 48 |
| 6.2. Popis slika .....                                      | 49 |
| 6.3. Popis tablica .....                                    | 49 |
| 6.4. Popis grafikona.....                                   | 49 |

## Sažetak

Hidrotehnički kanali su umjetno izgrađeni vodni tokovi i objekti za prostorni raspored vode. Predstavljaju jedan od ključnih elemenata u upravljanju vodama i imaju važnu ulogu u mnogim područjima ljudskog života. Kao specijalizirani sustavi za kontrolu i usmjeravanje voda, ovi kanali pomažu u raznim sektorima poput poljoprivrede, urbanog planiranja, zaštite okoliša i proizvodnje energije. U kontekstu sve većih izazova poput klimatskih promjena, urbanizacije i povećanih potreba za vodom, uloga hidrotehničkih kanala postaje sve važnija. Ovi sustavi omogućuju optimalnu raspodjelu i kontrolu vodnih resursa, smanjujući rizik od poplava, osiguravajući dovoljnu količinu vode za navodnjavanje i pomažući u proizvodnji hidroenergije. Također, omogućuju učinkovito upravljanje oborinskim vodama i sprječavaju štete koje mogu nastati uslijed neprikladnog odvodnjavanja. Rad se fokusira na razne aspekte hidrotehničkih kanala, uključujući njihove vrste, konstrukcijske značajke, funkcionalne svrhe te izazove u održavanju. Prikazan je i primjer iz prakse koji ilustrira kako se ovi objekti projektiraju za specifične potrebe.

*Ključne riječi: hidrotehnički kanali; odvodnja; navodnjavanje; hidroenergija; projektiranje kanala*

## **Abstract**

*Hydrotechnical channels are artificially constructed water courses and facilities for the spatial distribution of water. They represent one of the key elements in water management and play an important role in many areas of human life. As specialized systems for controlling and directing water, these canals help in various sectors such as agriculture, urban planning, environmental protection and energy production. In the context of increasing challenges such as climate change, urbanization and increased water needs, the role of hydrotechnical channels is becoming increasingly important. These systems enable the optimal distribution and control of water resources, reducing the risk of flooding, ensuring sufficient water for irrigation and helping to produce hydropower. Also, they enable efficient management of rainwater and prevent damages that may occur due to inappropriate drainage. The paper is focusing on various aspects of hydraulic channels, including their types, construction features, functional purposes and maintenance challenges. An example from practice that illustrates how these facilities are designed for specific needs is also presented.*

*Keywords: hydraulic channels; drainage; irrigation; hydropower; channel design*



## 1. Općenito o hidrotehničkim kanalima

Hidrotehnički kanali su najstarije hidrotehničke građevine i njihova povijest je duboko ukorijenjena u razvoju ljudskih civilizacija. Već u drevnim civilizacijama poput Egipta, Mezopotamije i Rima, ljudi su gradili jednostavne kanale za navodnjavanje i regulaciju vodnih resursa. Egipćani su koristili kanale za distribuciju vode s Nila, dok su Rimljani razvijali složene sustave akvadukta i kanalizacije. Ovi drevni sustavi omogućili su održavanje poljoprivredne proizvodnje i razvoj urbanih područja.

Razvojem tehnologije i inženjeringa hidrotehnički kanali su se značajno modernizirali. U 19. i 20. stoljeću, s industrijskom revolucijom i urbanizacijom, došlo je i do potrebe za sofisticiranijim i učinkovitijim sustavima upravljanja vodama. Moderni hidrotehnički kanali, koji koriste materijale kao što su beton, čelik i plastika, ne samo da služe osnovnim funkcijama kao što su navodnjavanje i odvodnja, nego imaju i ključnu ulogu u regulaciji vodnih tokova i zaštiti od poplava u urbanim sredinama.

Osim što služe tehničkim funkcijama kanali također imaju važnu ekološku dimenziju. Oni mogu utjecati na lokalne ekosisteme, mijenjati prirodne tokove rijeka i utjecati na biljke i životinje koje ovise o prirodnim vodnim putovima. Stoga, u modernom inženjeringu, postoji sve veći fokus na održivosti i minimalizaciji negativnih utjecaja na okoliš.

S obzirom na sve izraženije klimatske promjene, poput učestalih suša i poplava, te povećanu urbanizaciju, pravilno projektiranje, izgradnja i održavanje hidrotehničkih kanala postaje još važnije. Suvremeni pristupi uključuju primjenu naprednih tehnologija za praćenje i upravljanje vodama, inovacije u materijalima i konstrukciji te integraciju s drugim sustavima za upravljanje vodama [1].

Projektiranje kanala predstavlja složen inženjerski zadatak koji se može shvatiti kao kreacija novog umjetnog vodotoka sa specifičnom funkcionalnošću. Ovaj proces uključuje nekoliko ključnih elemenata koji zajedno čine osnovu za efikasno i funkcionalno upravljanje vodama.

Ključni elementi projektiranja kanala obuhvaćaju:

- **Trasa kanala:** Određuje pravac kojim kanal prolazi s obzirom na zadane uvjete.
- **Poprečni profil kanala:** Određuje oblik kanala u poprečnom presjeku, što uključuje njegovu širinu i dubinu.
- **Uzdužni pad:** Razlikuje se između minimalnog i maksimalnog dopuštenog pada koji utječe na brzinu protoka vode i stabilnost kanala.
- **Obloženošću / neobloženošću pokosa i dna:** Određuje se koja vrsta obloge će se koristiti kako bi se osigurala efikasnost kanala i minimizirao trošak održavanja.
- **Građevine na kanalu:** Uključuju građevine za upravljanje vodom te održavaju uvjete tečenja u kanalu

Svaki od ovih elemenata je međusobno povezan i njihova međusobna usklađenost je ključna za uspješan dizajn. Promjena u jednom od ovih elemenata nužno utječe na ostale. Na primjer, prilagodba trase kanala može zahtijevati promjene u poprečnom i uzdužnom profilu kako bi se postigla željena funkcionalnost i minimizirali hidraulički gubici.

Svi ovi faktori moraju se pažljivo razmotriti i uskladiti kako bi se stvorio kanal koji ne samo da ispunjava projektne zahtjeve, već i osigurava dugoročnu operativnost i održivost [1].

### 1.1. Trasa kanala

Odabir optimalne trase za kanal temelji se na (a) istražnim radovima koji uključuju topografske, hidrološke, hidrauličke, inženjerskogeološke, hidrogeološke i geotehničke podatke, te (b) varijantnom projektiranju koje uzima u obzir racionalnost, tj. funkcionalnost, izvedivost i troškove. Stoga je pri izboru trasa kanala ključno usporediti nekoliko varijanti kako bi se odabrala ona koja zahtijeva najmanje investicijske i operativne troškove, kako za sam kanal, tako i za povezane hidrotehničke objekte. Ako su terenski uvjeti isti, optimalna trasa kanala prema kriteriju minimiziranja troškova izgradnje i eksploatacije je pravocrtna, budući da svako odstupanje može povećati troškove. Ipak, kraća trasa može povremeno zahtijevati veće zemljane radove u odnosu na dužu trasi koja slijedi izohipse, što može rezultirati manjim količinama nepotrebnog iskopavanja [2].

Važno je napomenuti da se kanali obično izvode u iskopu, što znači da će biti potrebno prikladno zbrinuti višak iskopanog materijala.

Pravolinijska trasa općenito je prihvatljiva za sve vrste kanala s obzirom na njihovu namjenu. Na primjer, za plovne kanale pravocrtna trasa predstavlja najkraći put, za derivacijske kanale minimizira gubitke energije zbog pada, dok kod odvodnih kanala omogućuje najbržu odvodnju viška vode.

Međutim, u nekim slučajevima kanal se ne može uvijek izvesti u pravcu. Ako (a) terenski uvjeti duž željene trase kanala često variraju i pojavljuju se prepreke poput prometnica, naselja ili prirodnih vodotoka, ili (b) funkcionalni zahtjevi ili potreba za povezivanjem prometnih čvorišta kod plovnih kanala zahtijevaju odstupanje od pravca.

Kada se kanal ne može održati u pravcu i treba ga trasirati kroz krivine, važno je nastojati minimizirati zakrivljenost trase. To znači da treba odabrati što veće radijuse krivina i duže međupravce. To je posebno značajno za plovne kanale, kod kojih minimalni radijusi proizlaze iz klase kanala kao plovnog puta. Kod ostalih se kanala preporučuje da minimalni radijus krivine,  $r_{min}[m]$ , bude [2]:

$$r_{min} = 11v^2 \sqrt{A} + 12 \quad \text{ili} \quad r_{min} > 5b$$

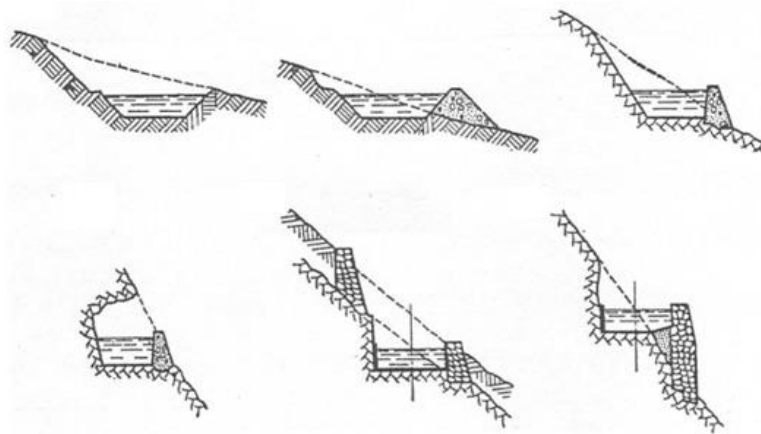
gdje je:

- $v$  - srednja brzina vode u kanalu [ $ms^{-1}$ ]
- $A$  - protjecajna površina [ $m^2$ ]
- $b$  - širina dna kanala [ $m$ ]

Kod neobloženih kanala u aluvijalnim tlima, koja su sklona eroziji, ključno je koristiti blage krivine. Međutim, radijusi krivina trebaju biti prilagođeni i prema brzini vode i kapacitetu kanala, uzimajući u obzir i vrstu tla.

Kada kanal prelazi prometnice, pravilo je da kanal ima prioritet [2].

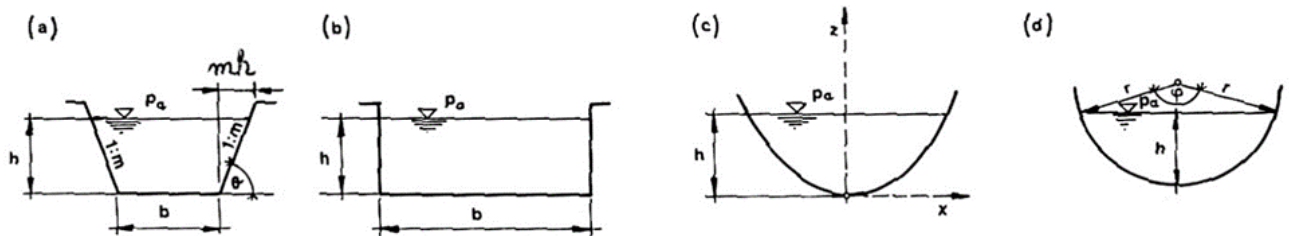
Prilikom trasiranja kanala, posebno je važno biti oprezan kod vođenja kanala niz padinu. Položaj nasipa na padini zahtijeva posebne mjere za osiguranje stabilnosti, kako bi se spriječila erozija i klizanje tla:



**Slika 1.** Izvedbe kanala na padini [2]

## 1.2. Profil kanala

Profil hidrotehničkog kanala predstavlja ključni element u njegovom dizajnu jer izravno utječe na učinkovitost i funkcionalnost kanala. Ispravno oblikovan profil kanala osigurava optimalan protok vode, minimizira gubitke i troškove održavanja, te smanjuje rizik od erozije i drugih problema. Kod otvorenih kanala, koji su najzastupljeniji, kanali se izvode trapeznog i pravokutnog, paraboličnog i polukružnog profila:



**Slika 2.** Oblici poprečnih profila kanala [2]

### a) Trapezni Profil

U praksi, zbog dostupne mehanizacije i izazova pri izgradnji drugih profila, najčešće se susrećemo s kanalima trapeznog profila. Iako je polukružni profil hidraulički najpovoljniji jer, pri istoj protjecajnoj površini  $A$ , postiže najveći hidraulički radijus  $R$ , što rezultira najmanjim hidrauličkim padom  $\Delta H/\Delta L$ . Trapezni profil se koristi zbog svoje fleksibilnosti i učinkovitosti. Ovaj profil ima šire dno i uske strane, što omogućuje stabilan protok i upravljanje erozijom. Širi donji dio omogućuje veći protok pri manjem nagibu, dok uske strane smanjuju količinu materijala potrebnog za izgradnju [1].

**Prednosti:**

- Stabilnost: Bolje upravljanje erozijom i klizanjem tla.
- Fleksibilnost: Prilagodljiv različitim uvjetima tla i zahtjevima protoka.

**Nedostaci:**

- Veći prostor za izgradnju: Širi profil može zahtijevati više prostora, što može biti problematično u urbanim područjima.

**b) Pravokutni Profil**

Pravokutni profil ima ravne strane i dno, što omogućuje uniforman protok i jednostavno održavanje. Ovaj profil je često korišten u urbanim sredinama i industrijskim aplikacijama gdje su potrebne precizne specifikacije za upravljanje vodom.

**Prednosti:**

- Jednostavnost: Lako održavanje i čišćenje.
- Preciznost: Omogućuje precizno upravljanje vodom.

**Nedostaci:**

- Erozijska: Ravne strane mogu biti sklone eroziji, što zahtijeva dodatne mjere zaštite.

**c) Polukružni Profil**

Polukružni profil, s polukružnim dnom i uspravnim stranama, koristi se za male vodene staze i drenažne sustave. Ovaj profil pomaže u smanjenju otpora i može biti učinkovit za određene vrste protoka.

**Prednosti:**

- Smanjenje otpora: Poboljšava protok u specifičnim uvjetima.
- Pogodnost za male sustave: Učinkovit za manje kanale i drenažne sustave.

**Nedostaci:**

- Ograničena primjena: Nije uvijek prikladan za veće ili složenije kanale.

#### d) Parabolični Profil

Parabolični profil ima dno u obliku parabole, s ravnim ili blago zakrivljenim stranama. Ovaj profil se koristi za optimizaciju protoka u kanalima poput onih za navodnjavanje i odvodnjavanje.

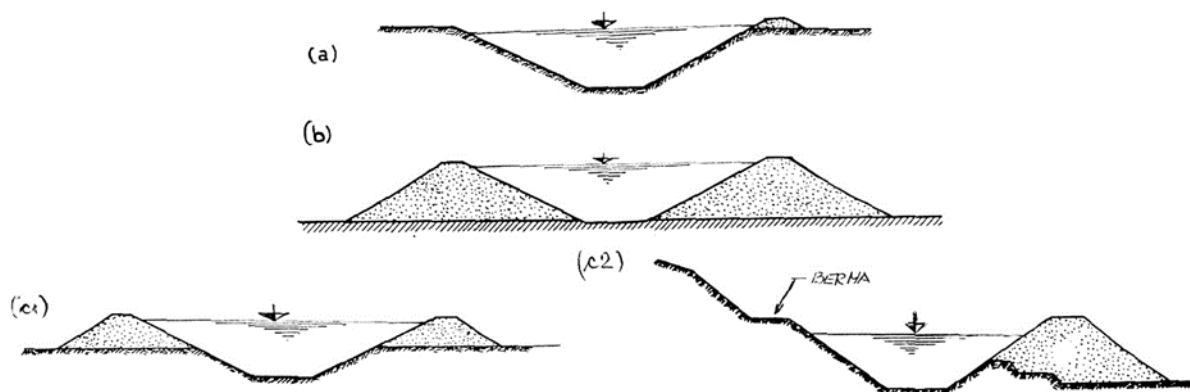
#### Prednosti:

- Optimizacija protoka: Pomaže u postizanju stabilnog i učinkovitog protoka.
- Smanjenje erozije: Efikasno upravljanje vodom i smanjenje erozije.

#### Nedostaci:

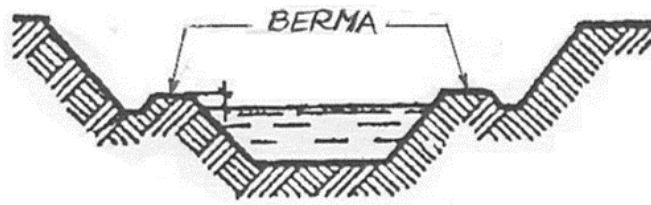
- Kompleksnost dizajna: Može zahtijevati složenije izračune i dizajn.

Kanal može biti izveden na različite načine: a) može biti u usjeku (ukopan), b) u nasipu ili c) kombiniran (u usjeku i nasipu). Širina krune nasipa trebala bi biti najmanje 2 do 3,5 metra kako bi se omogućila komunikacija i pristup za održavanje kanala.



**Slika 3.** Načini izvedbe kanala [2]

Za veće dubine, odnosno dublje usjeke, u praksi se često koristi trapezni raščlanjeni profil kanala. Ovi kanali imaju omočenu (podvodnu) i suha (nadvodnu) kosinu koje su odvojene bermom. Berma štiti kanal od površinskih voda koje se slijevaju s kosine i olakšava održavanje kanala. Širina berme treba biti najmanje 1 metar i uz nju se postavlja sabirni jarak uzduž pridnenog dijela nadvodne kosine. Ovaj jarak prikuplja površinske vode, koje se zatim odvede u kanal putem poprečnih kanalića smještenih svakih 100 do 200 metara [2].



**Slika 4.** Trapezni raščlanjeni profil kanala [2]

Zatvoreni kanali najčešće se koriste za odvodnju otpadnih voda, a ponekad se primjenjuju i za derivacijske kanale, obično na kritičnim dionicama i u kraćim udaljenostima. Ovi kanali grade se u obliku betonskih i armiranobetonskih cijevi, koje mogu biti kružnog, izduženog (jajolikog, polukružnog ili pravokutnog) ili stlačenog (potkovičastog i kapastog) profila.

Kao i kod svih zatvorenih kanala, potrebno je održavati razinu vode ispod vrha kanala kako bi se omogućilo tečenje s slobodnim vodnim licem [2].

#### **Prednosti zatvorenih hidrotehničkih kanala**

- **Zaštita od kontaminacije:** Zatvoreni kanali sprječavaju kontakt tekućine s okolinom, čime se smanjuje rizik od kontaminacije.
- **Smanjenje erozije:** Budući da voda nije izložena otvorenom okruženju, smanjuje se erozija zemljišta oko kanala.
- **Manje održavanje:** Zatvoreni kanali zahtijevaju manje održavanja u usporedbi s otvorenim kanalima zbog zaštite od vanjskih utjecaja.

#### **Nedostaci zatvorenih hidrotehničkih kanala**

- **Visoki troškovi Izgradnje:** Zatvoreni kanali često su skuplji za izgradnju zbog potreba za specijaliziranim materijalima i tehnologijama.
- **Kompleksnost održavanja:** Iako zahtijevaju manje održavanja u normalnim uvjetima, bilo kakvi problemi unutar kanala mogu biti teže otkriveni i riješeni.
- **Ograničen pristup:** Ako dođe do zagušenja ili oštećenja, pristup kanalu za popravke može biti složen.

### 1.3. Uzdužni pad kanala, maksimalne i minimalne brzine

Uzdužni pad kanala odnosi se na promjenu visine koja se javlja duž njegove dužine. Ovaj pad igra ključnu ulogu u hidrotehničkom dizajnu i funkcionalnosti kanala, jer utječe na brzinu i način protoka vode unutar kanala. Pravilno projektiranje uzdužnog pada ključno je za postizanje učinkovitog i sigurnog vodnog transporta, minimiziranje rizika od erozije i osiguranje dugovječnosti kanala.

Najpovoljnije rješenje s aspekta troškova iskopa postiže se kada uzdužni pad dna kanala bude usklađen s padom terena, što znači da je uzdužni pad kanala identičan padu terena u smjeru trase. U tom slučaju, profil kanala ostaje konstantan duž cijele trase. Međutim, ovo idealno stanje ne može se uvijek postići zbog različitih ograničenja, kao što su specifične namjene kanala (npr. derivacijski kanal za hidroelektranu) ili uvjeti protoka u kanalu (npr. prevelike ili premale brzine protoka) [2].

Uzdužni pad je važan iz nekoliko razloga:

- **Kontrola Protoka:** Određuje brzinu protoka vode unutar kanala. Veći pad omogućava brži protok, dok manji pad može usporiti vodu, što je korisno za različite primjene.
- **Smanjenje Erozije:** Nepravilno projektirani pad može uzrokovati prekomjernu eroziju kanala ili okolnog tla. Pravilno određivanje uzdužnog pada pomaže u održavanju stabilnosti kanala i sprječavanju oštećenja.
- **Učinkovitost:** Pomaže u održavanju optimalnih uvjeta protoka vode. Ako je pad previše nagao, voda može teći prebrzo i izazvati eroziju ili oštećenja; ako je preblag, voda može stagnirati i izazvati taloženje sedimenta.

S obzirom na to da su uzdužni pad kanala i brzina protoka funkcijski povezane u hidrauličkom smislu, prilikom razmatranja padova dna kanala, važno je istovremeno razmotriti i brzine kojima zadani protok prolazi kroz kanal.

Prevelike brzine, koje proizlaze iz velikih padova kanala, mogu izazvati visoku energiju i eroziju neobloženih kanala. S druge strane, male brzine uzrokovane manjim padovima mogu dovesti do taloženja čestica koje su u vodi, što može uzrokovati zamuljivanje kanala. Stoga je ključno spriječiti unos nanosa u kanal koji kanal ne može učinkovito transportirati. Idealno je postaviti kanal tako da tok rijeke nosi nanos pored ulaza u kanal ili da se pretežit dio nanosa



zadrži na ulazu u kanal pomoću taložnica. Ovo je posebno važno kod projektiranja kanala za navodnjavanje i derivacijskih kanala.

Za plovne i derivacijske kanale, koji se često grade s minimalnim padom, to je osobito značajno, jer se kod derivacijskih kanala teži postizanju što veće koncentracije padova. U slučajevima kraćih dionica, može se primijeniti čak i horizontalno izvođenje. Kanali kod kojih pad nije od ključne važnosti obično se projektiraju s ciljem minimiziranja obima iskopa. Kod kanala za odvodnju i navodnjavanje, također se koriste relativno mali padovi kako bi se postigle manje brzine, čime se smanjuje rizik od erozije i omogućava učinkovitija kontrola protoka [1].

Općenito, pri projektiranju i hidrauličkom proračunu kanala, preporučuje se usklađivanje s prosječnim vrijednostima brzina za obložene i neobložene kanale, u skladu s dubinom vode prikazanom u tablici:

**Tablica 1.** Preporučljive srednje brzine u kanalima u ovisnosti o dubini vode [2]

| Tlo ili obloga            | Dijametar zrna (mm) | Dubina<br>0,4 m | Dubina<br>1,0 m | Dubina<br>2,0 m | Dubina<br>3,0 m |
|---------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Pijesak sitni             | 0,05-0,25           | 0,20-0,35       | 0,30-0,45       | 0,40-0,55       | 0,45-0,60       |
| Pijesak srednji           | 0,25-1,00           | 0,35-0,50       | 0,45-0,60       | 0,55-0,70       | 0,60-0,75       |
| Pijesak krupni            | 1,00-2,50           | 0,50-0,65       | 0,60-0,75       | 0,70-0,80       | 0,75-0,90       |
| Šljunak sitni             | 2,50-5,00           | 0,65-0,80       | 0,75-0,85       | 0,80-1,00       | 0,90-1,00       |
| Šljunak srednji           | 5,00-10,00          | 0,80-0,90       | 0,85-1,05       | 1,00-1,15       | 1,00-1,30       |
| Šljunak krupni            | 10,00-15,00         | 0,90-1,10       | 0,05-1,20       | 1,15-1,35       | 1,30-1,50       |
| Oblutak sitni             | 15,00-25,00         | 1,10-1,25       | 1,20-1,45       | 1,35-1,65       | 1,50-1,85       |
| Oblutak srednji           | 25,00-40,00         | 1,25-1,50       | 1,45-1,85       | 1,65-2,10       | 1,85-2,30       |
| Oblutak krupni            | 40,00-75,00         | 1,50-2,00       | 1,85-2,40       | 2,10-2,75       | 2,30-3,10       |
| Kamen - drobljenac        | 75-150              | 2,00-3,00       | 2,40-3,35       | 2,75-3,75       | 3,10-4,10       |
| Kamen - drobljenac        | 150-250             | 3,00-3,50       | 3,35-3,80       | 3,75-4,30       | 4,10-4,65       |
| Glina                     |                     | 0,70-2,00       | 0,85-2,50       | 0,95-3,00       | 1,10-3,50       |
| Jednoslojna kamena obloga | 150-250             | 2,50-3,50       | 3,00-4,00       | 3,50-4,50       | 4,00-5,00       |
| Dvoslojna kamena obloga   | 150-200             | 3,50            | 4,50            | 5,00            | 5,50            |
| Beton raznih marki        |                     | 5,0-6,5         | 6,0-8,0         | 7,0-8,0         | 7,5-10,0        |
| Asfalt                    |                     | 3,0             | 4,0             | 4,5             | 5,0             |

#### 1.4. Obloga kanala

Kanali općenito mogu biti obloženi ili neobloženi. Obloge hidrotehničkih kanala su važan aspekt u njihovom projektiranju i održavanju jer značajno utječu na dugovječnost kanala, kontrolu erozije, i efikasnost protoka. Razlozi za oblaganje kanala mogu biti različiti, uključujući [2]:

- **Prevenција gubitaka vode:** Obloge sprječavaju procjeđivanje vode iz kanala.
- **Smanjenje hrapavosti:** Obloge smanjuju hrapavost unutarnjih površina kanala, što smanjuje hidrauličke gubitke.
- **Povećanje dopuštene brzine:** Obloge omogućuju veće brzine protoka, veće padove, kraće trase i manje protjecajne površine.

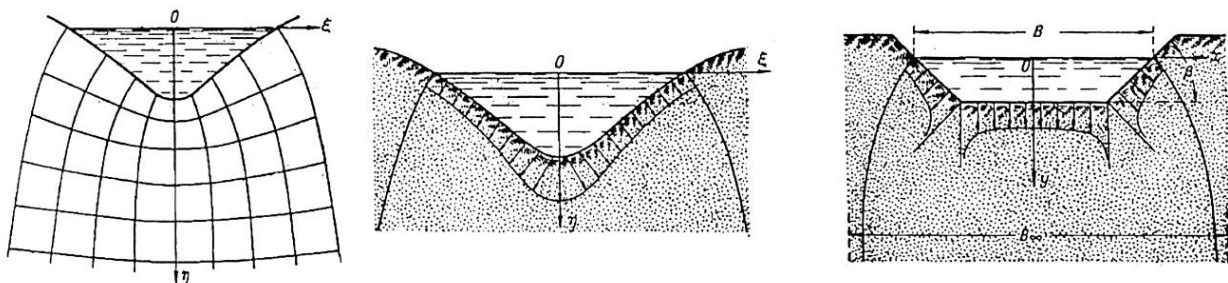
- **Smanjenje troškova održavanja:** Obloge mogu smanjiti potrebe za čestim održavanjem kanala.
- **Zaštita okoliša:** Obloge sprječavaju kontaminaciju okoliša uzrokovanu procjeđivanjem vode u podzemlje ili stvaranjem bara u depresijama uzduž kanala.

Ovi faktori mogu se pojaviti pojedinačno, u kombinaciji ili kao skupina.

Osnovni izazovi pri dimenzioniranju neobloženih kanala uključuju probleme s gubicima vode, zamuljivanjem, erozijom i ravnotežom pronosa nanosa. Ako voda koja teče kroz kanal nosi nanos ili ako je kanal izgrađen u materijalu sklonom eroziji, ključno je spriječiti taloženje nanosa ili eroziju kanala [2].

Važno je napomenuti da mnogi kanali u materijalima koji nisu koherentni mogu postati otporni na eroziju zahvaljujući kolmataciji i "cementiranju" koje se odvija zbog vrlo sitnih koloidnih čestica prisutnih u vodi. Te čestice talože se na omočenim površinama kanala i povezuju nekoherentne čestice, čime se postupno povećava otpornost na eroziju.

Problem gubitaka vode iz kanala u propusnim tlima je složen i često zahtijeva detaljnu analizu. Na slici je prikazana mreža i vektori brzina filtracije oko perimetra paraboloidnog i trapeznog kanala [2].



**Slika 5.** Vektori brzina i strujna mreža filtracije po poprečnom presjeku [2]

Izbor tipa obloge za kanal ovisi o lokalnim uvjetima i specifičnim zahtjevima zaštite. Obloge trebaju biti prilagođene različitim izazovima i uvjetima, uključujući [1]:

- **Otpornost na uzgon:** Obloge moraju biti dizajnirane da izdrže silu uzgona koja može nastati zbog prisutnosti podzemnih voda ili promjena u tlaku.
- **Seizmička otpornost:** Trebaju biti sposobne izdržati dinamičke seizmičke sile i vibracije koje mogu nastati uslijed potresa.

- **Biološka korozija:** Obloge trebaju biti otporne na biološku koroziju uzrokovanu mikroorganizmima ili drugim živim organizmima.
- **Probijanje raslinja:** Trebaju se zaštititi od probijanja korijena biljaka i raslinja koji mogu oštetiti oblogu.
- **Otpornost na led i valove:** Obloge moraju podnijeti djelovanje leda i valova, posebno u područjima gdje su temperature niske ili gdje su prisutni valovi.

Odabir pravog materijala za oblogu ključan je za osiguranje dugotrajne i učinkovite zaštite kanala.

Najčešće obloge kanala su [2]:

- glinena
- kamena
- od opeke
- gabionska
- asfaltbetonska
- betonska
- od plastičnih sintetičkih folija

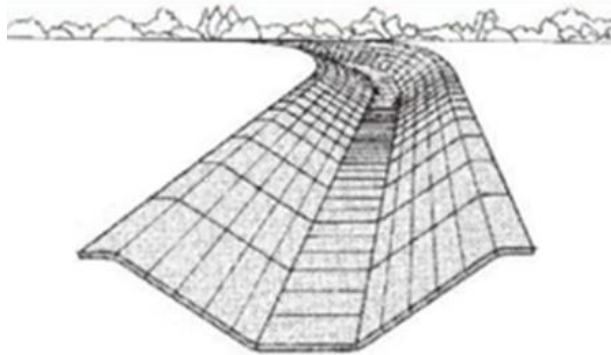
**Glinena obloga**, debljine 0,2 do 0,3 [m], koristi se primarno za postizanje vodonepropusnosti. Međutim, zbog svoje sklonosti vodnoj eroziji, glinene obloge imaju privremen karakter ako nisu zaštićene. Kod ukopanih kanala, to se postiže dodatnim zemljanim slojem debljine 0,2-0,5 [m], dok se kod kanala u nasipu glinena obloga može integrirati u tijelo nasipa kao kosa ili vertikalna zaptivna glinena jezgra.

**Kamene obloge** koriste se za zaštitu kosina od razaranja uzrokovanog valovima ili plovilima, te vodnom erozijom. Izvode se kao jednoslojne obloge debljine 0,15 - 0,3 [m], ili dvoslojne debljine 0,4 - 0,5 [m], na šljunčanoj podlozi debljine 0,2 - 0,3 [m].

**Obloga od opeke** se zbog složenosti ugradnje trenutno primjenjuje samo kod manjih kanala i u zemljama s jeftinijom radnom snagom.

**Gabionske obloge** su fleksibilne i koriste čelično ili plastično žičano pletivo, s pitanjem trajnosti zbog korozije ili insolacije. Za djelomičnu vodonepropusnost, gabioni se prekrivaju

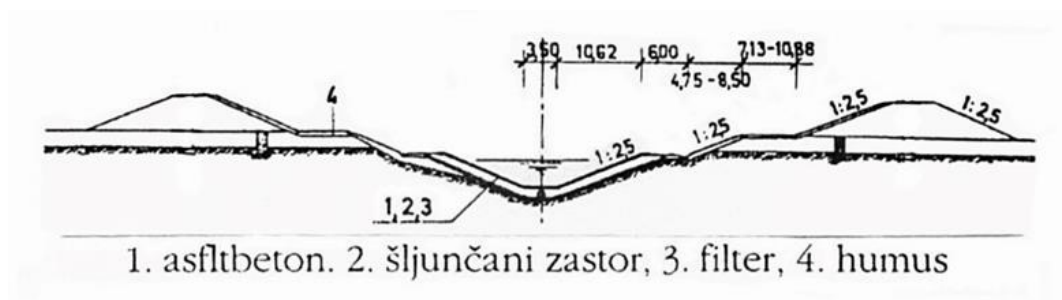
slojem asfalt mastiksa, dok za potpunu vodonepropusnost potrebno je ispuniti cijeli gabionski zastor mastiksom. Debljina gabionskih obloga varira od 0,15 [m] za brzine vode do 1,8 [m/s] te 0,3 - 0,5 [m] za brzine do 5,5 [m/s].



**Slika 6.** Gabionska obloga [5]

**Asfaltbetonske** obloge, koje se sastoje od mješavine bitumena i mineralnih tvari, primjenjuju se kod kanala u zemljanim materijalima, posebno u nasipima, gdje postoji rizik od slijeganja. Ova vrsta obloge, čija je prosječna debljina između 5 i 10 [cm], odlikuje se visokim stupnjem vodonepropusnosti i niskim koeficijentom hrapavosti.

U kanalima s ovim tipom obloge brzine vode ne smiju prelaziti 2 [m/s]. Međutim, treba imati na umu da ova obloga može biti podložna oštećenjima zbog probijanja raslinja.



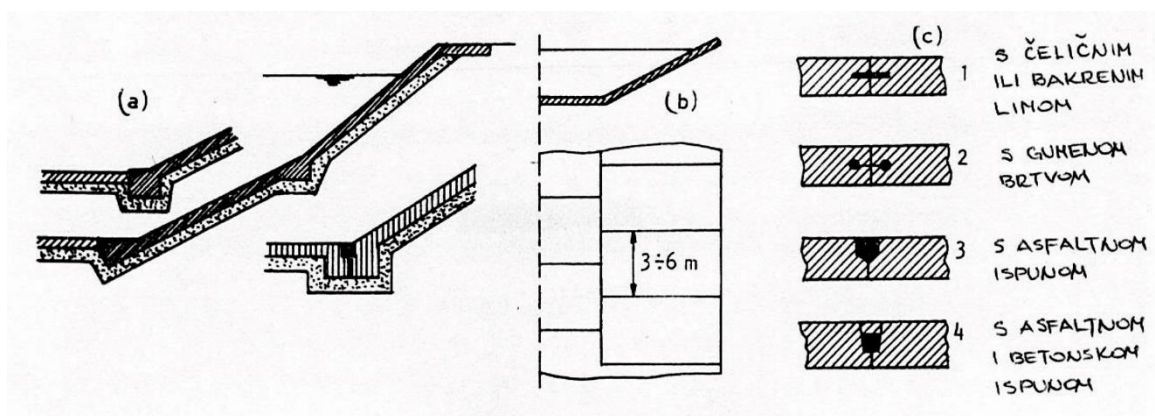
**Slika 7.** Asfaltbetonska obloga [2]

**Betonske obloge** su najčešće korištene zbog svoje sposobnosti da uspješno zadovolje sve zahtjeve koji se postavljaju pred oblogama. Također, omogućuju potpuno mehaniziranu izvedbu, što dodatno doprinosi njihovoj popularnosti. Betonske obloge mogu biti različitih vrsta, uključujući [2]:

- Prefabricirane betonske elemente
- Klasične betonske obloge izvedene na licu mjesta
- Armiranobetonske obloge
- Prednapregnute betonske obloge
- Obloge od mlaznog betona
- Obloge od vakuum betona
- Obloge od uvaljanog betona

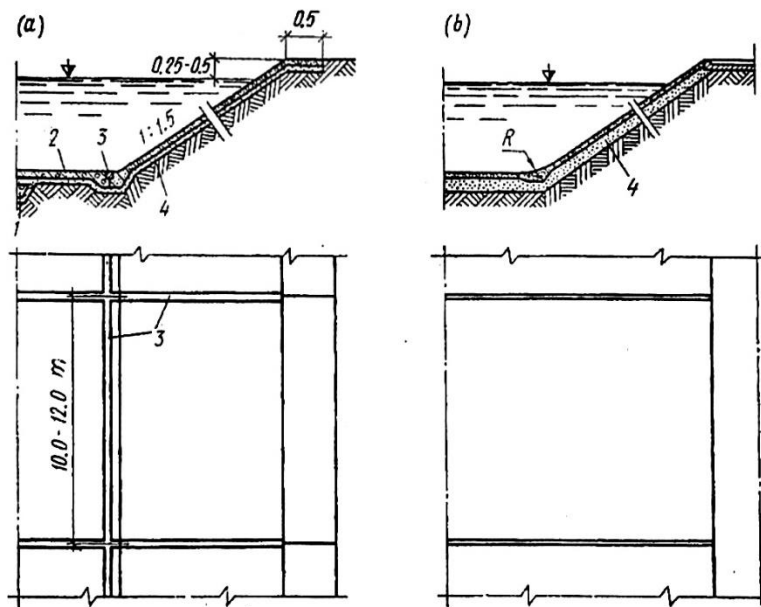
Prefabricirani betonski elementi, obično u obliku ploča debljine 5-10 cm, odlikuju se visokim fizičko-mehaničkim karakteristikama i vodonepropusnošću. Ove ploče dolaze u različitim dimenzijama i mogu imati ravne rubove, utor i pero, ili rubove predviđene za ugradnju plastičnih brtvi koje omogućuju dilataciju betonskog zastora.

Klasične betonske obloge izvedene na licu mjesta obično se izrađuju u obliku betonskih ploča debljine 10-20 cm koje se postavljaju na sloj šljunka ili pijeska. Za ove obloge nužno je uključiti radne i dilatacijske spojnice kako bi se spriječilo stvaranje pukotina uslijed skupljanja i hidratacije. Dilatacijske spojnice mogu biti podužne, poprečne, ili raspoređene u smaknutom rasporedu. Njihova vodonepropusnost osigurava se korištenjem bakrenih, gumenih, plastičnih, asfaltnih ili asfalt-betonskih brtvila [2].



**Slika 8.** Klasična betonska obloga [2]

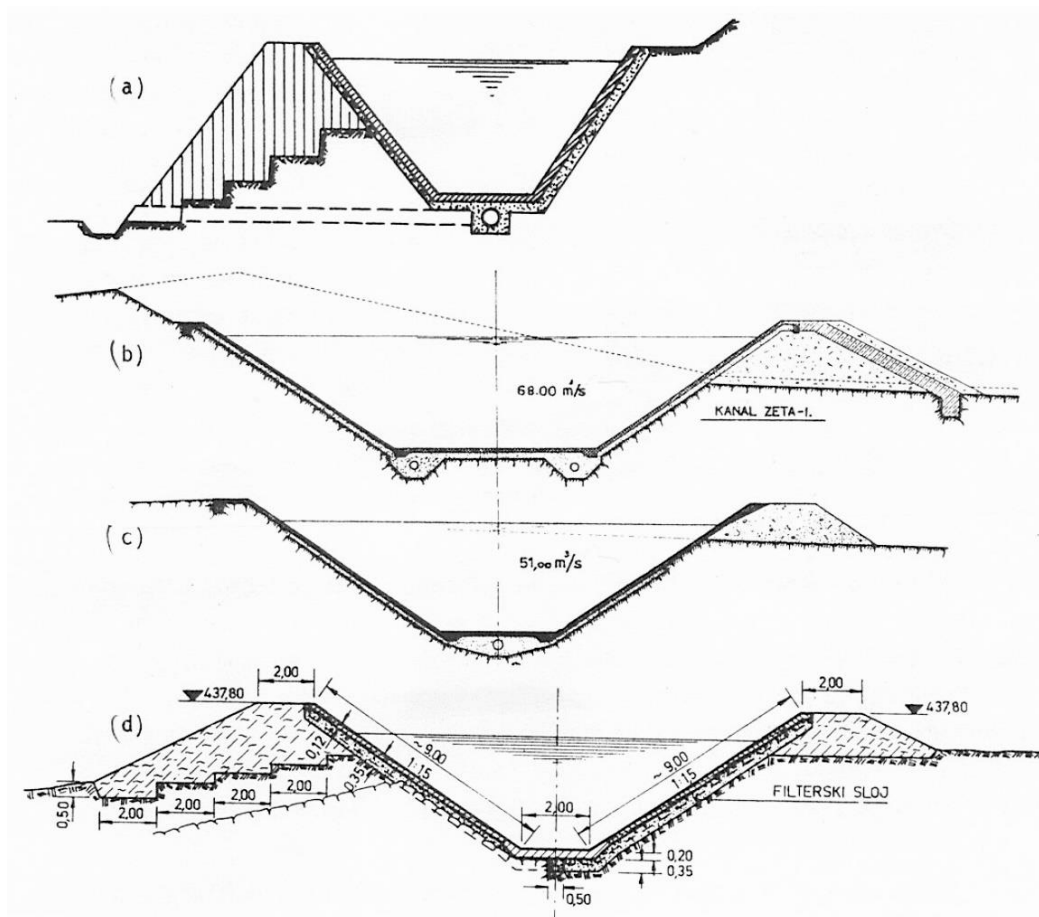
**Armiranobetonske obloge** su ploče od betona s križnom armaturom, debljine do 15 [cm], koje sadrže oko 2 [%] armature. Ove obloge koriste se u težim geološko-geomehaničkim uvjetima i omogućuju povećanje razmaka radnih i dilatacijskih spojnica na 10 - 12 [m]. Namijenjene su za sprječavanje pojave pukotina i izjednačavanje lokalnih razina u slučaju slijeganja.



**Slika 9.** Armiranobetonska obloga [2]

Kod svih tipova obloga, a osobito kod vodonepropusnih, obavezna je drenaža zbog statičkih razloga. Statistički, obloga se može smatrati pločom koja je oslonjena na elastičnoj podlozi. Dok dobro podnosi hidrostatičko opterećenje na podlogu, nije sposobna izdržati značajnija opterećenja u suprotnom smjeru, poput tlaka vode iz priobalja. Ovo opterećenje može biti značajno, posebno pri visokim razinama podzemnih voda ili brzom pražnjenju kanala.

Da bi se spriječilo ovo nepovoljno opterećenje, obloga kanala mora biti drenirana duž cijele dužine. Drenažni sustav obično se sastoji od sloja šljunka koji se postavlja ispod obloge kao tampon, te drenažnih cijevi postavljenih uzduž kanala. Ove cijevi imaju poprečne ispuste koji odvođe dreniranu vodu izvan kanala [1].



**Slika 10.** Primjeri instalacije drenažnih sustava [2]

**Prednapregnute betonske obloge** izvide se kao tanke i uske ploče ili trake, s debljinom od samo nekoliko centimetara i širinom nešto preko 1 metra, često za kanale paraboličnog ili polukružnog profila. Armiranje se vrši specijalnim čeličnim žicama promjera od 3 do 5 mm.

**Obloge od mlaznog betona** mogu biti nearmirane ili armirane, s debljinom od 5 do 10 cm.

**Obloge od vakuum betona** izrađuju se od prefabriciranih betonskih ploča pomoću vakuum postupka. Ovaj beton se priprema tako da se na slobodnu površinu betona postavlja vakuum oplata s filtrom od prirodnih ili umjetnih vlakana (geotekstil), koji sprječava uklanjanje finih čestica cementa i sitnog materijala. Korištenjem vakuum sisaljki uklanja se dio vode odmah nakon ugrađivanja betona, čime se smanjuje vodocementni faktor. Ovaj postupak poboljšava kompaktnost betona, smanjuje skupljanje, te povećava gustoću, čvrstoću i vodonepropusnost betona [2].



**Obloge od uvaljanog betona** izvode se koristeći tehnologiju sličnu onoj koja se primjenjuje za betonske gravitacijske brane.

**Obloge od plastičnih sintetičkih folija** (geomembrane) koriste se prvenstveno za postizanje vodonepropusnosti kanala. Mogu se izvoditi sa ili bez površinske zaštite. Pri odabiru profila kanala treba uzeti u obzir da geomembrane zahtijevaju blaže nagibe pokosa (od 1 : 2,0 do 1 : 3,5) zbog njihove slabe otpornosti na klizanje. Geomembrana obično mora biti usidrena u podlogu, što se olakšava primjenom membrana s rebrima za usidrenje dostupnim na tržištu. Suvremene folije omogućuju varenjem spojeva, što sve više zamjenjuje preklapanje (5 - 10 cm) i ljepljenje spojeva. Ako se koristi pokrovni sloj za zaštitu, izbor materijala ovisi o stabilnosti nagiba i brzini vode u kanalu [2].



**Slika 11.** Obloga od plastične sintetičke folije [6]

## 1.5. Građevine na kanalima

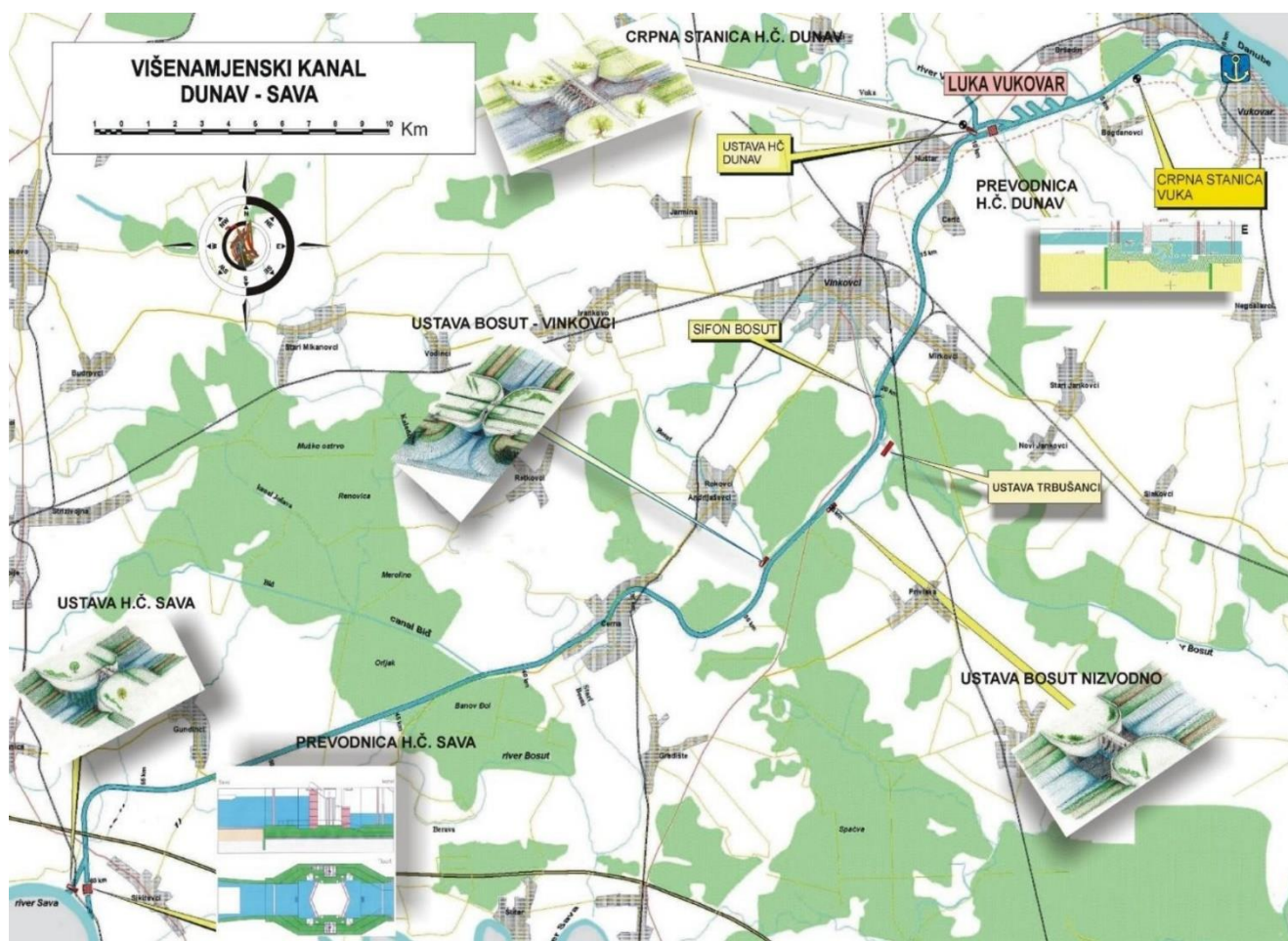
Kanal ne čini cjelinu bez građevina koje se nalaze na njemu. Hidrotehničke građevine na kanalima možemo podijeliti u dvije glavne skupine: one koje služe za upravljanje vodom (protokom i vodostajem) i one koje služe održavanju uvjeta tečenja u kanalima [2].

**Građevine za upravljanje vodom** uključuju:

- **Račve i ušća:** Na račvama kanal se odvaja od drugog vodotoka. Građevina je oblikovana za raspodjelu protoka vode, ali ne uključuje hidromehaničku opremu. Raspodjela protoka ovisi o hidrauličkim gubicima na samim građevinama. Na ušćima, koja predstavljaju spoj kanala s drugim vodotokom, mora se osigurati nesmetan protok vode i nanosa kako bi se izbjegli hidraulički gubici i taloženje nanosa. Oblikovanje ušća mora minimizirati remećenje strujne slike, spriječiti eroziju i taloženje.
- **Ustava:** Građevine na početku i kraju kanala koje uz pomoć zatvarača omogućuju kontrolirano propuštanje vode u kanal i iz njega.

**Građevine za održavanje uvjeta tečenja** uključuju:

- **Hidrotehničke stepenice:** Koriste se za disipaciju energije toka i koncentraciju hidrauličkog pada. Ove stepenice su posebno važna na kanalima čiji uzdužni pad ne odgovara prirodnom padu terena. U slučajevima kada su brzine vode previsoke i oblaganje korita nije ekonomski isplativo, hidrotehničke stepenice nude alternativu za smanjenje brzine toka i troškova oblaganja kanala.



**Slika 12.** Prikaz rasporeda ključnih hidrotehničkih građevina u višenamjenskom kanalu Dunav-Sava [7]

## 2. Hidrotehnički kanali prema namjeni

Hidrotehnički kanali mogu se klasificirati prema različitim funkcijama koje obavljaju u upravljanju vodama. Primjenjuju se u svrhu natapanja, odvodnje, plovidbe, energetike te proizvodnje hidroenergije. Svaka vrsta kanala ima specifične karakteristike i primjene koje su prilagođene potrebama koje treba zadovoljiti. Tako prema namjeni, hidrotehnički površinski (otvoreni) kanali, kao umjetni vodni tokovi mogu biti [1]:

- Oteretni kanali - za obranu od poplava
- Kanali za navodnjavanje ili irigacijski
- Odvodni kanali ili drenažni
- Plovni kanali - bez ili s prevodnicama za brodove
- Derivacijski kanali - za hidroelektrane (energetiku)
- Kanali za tranzit riba
- Kanali za prevoženje trupaca

### 2.1. Višenamjenski kanali

Naravno, jedan kanal može istodobno imati više namjena, što ima značajnu ulogu u optimizaciji resursa i efikasnosti. Tada je riječ o višenamjenskom kanalu. Ovakav pristup omogućuje bolju iskoristivost investicija i smanjenje troškova održavanja, jer se teret financiranja raspodjeljuje među različitim korisnicima [2].

Osim ekonomskih prednosti, višenamjenski kanali također doprinose održivosti okoliša, jer omogućuju integrirano upravljanje vodnim resursima, potiču biološku raznolikost i mogu igrati ulogu u smanjenju rizika od poplava. U tom kontekstu važna je suradnja različitih sektora i korisnika kako bi se razvila održiva rješenja koja koriste sve prednosti višenamjenskih kanala.

Višenamjenski kanali predstavljaju izazov prilikom dizajniranja zbog različitih zahtjeva koji se postavljaju na svaku od funkcija koje kanal treba obavljati. Svaki tip kanala, bez obzira na

to radi li se o odvodnji, navodnjavanju ili zaštiti od poplava, ima specifične parametre koje treba zadovoljiti, kao što su uzdužni pad, brzina protoka, poprečni profil i kapacitet.

Kada se pokušava postići rješenje koje može zadovoljiti više funkcija, često dolazi do situacije da se neki od zahtjeva ne mogu u potpunosti ispuniti. To rezultira kompromisima, gdje ni jedna od funkcija nije optimalno zadovoljena. Na primjer, kanal koji je dizajniran primarno za odvodnju može imati veće padove i brže protoke, što može negativno utjecati na kvalitetu vode i stanište riba, dok bi kanal koji je višefunkcionalan možda bio širi i plići, što poboljšava stanište, ali smanjuje kapacitet odvodnje.

Ova situacija naglašava važnost interdisciplinarnog pristupa i detaljnog ispitivanja svih potreba korisnika i ekosustava pri planiranju i projektiranju višenamjenskih kanala. U tom smislu, korištenje simbioze tehnoloških rješenja, ekoloških znanja i socijalnih potreba može pomoći u pronalaženju rješenja koja će maksimizirati funkcionalnost kanala unutar danih ograničenja, iako nijedno rješenje neće biti apsolutno optimalno za sve namjene. Razvijanje fleksibilnih i adaptivnih rješenja koja mogu odgovoriti na promjenjive uvjete i prioritete u budućnosti također se može pokazati korisnim pristupom [1].

## **2.2. Oteretni kanali**

Oteretni kanali grade se kada prirodni vodotok nije u mogućnosti primiti sav protok vode tijekom velikih voda, zbog čega može doći do ozbiljnih poplava u okolnim područjima. Glavni cilj ovih kanala je zaštita potencijalno ugroženih područja od štetnih posljedica poplava, čime se smanjuje rizik od oštećenja imovine, infrastrukture i okoliša.

U konstrukciji oteretnih kanala često se koriste trapezni raščlanjeni profili koji mogu imati nasip ili ne, ovisno o specifičnim uvjetima i potrebama. Trapezni profil omogućuje efikasno vođenje vode, dok nasipi pomažu u dodatnom usmjeravanju i kontroliranju protoka.

Povećanje omočenosti oteretnog kanala smanjuje površinu koja bi se mogla poplaviti, čime se štiti dolinsko zemljište i smanjuje mogućnost plavljenja područja uslijed rijetkih, ali izuzetno velikih vodnih valova.

Međutim, treba uzeti u obzir da u slučaju upotrebe trapeznog profila s nasipom, troškovi održavanja mogu značajno rasti s vremenom. Održavanje nasipa zahtijeva redovite preglede i intervencije kako bi se osigurala njegova funkcionalnost i učinkovitost u prevenciji poplava [1].

Osim toga, oteretni kanali često su povezani s prostorima za privremeno zadržavanje velikih voda, poput retencija ili akumulacija. Ovi prostori služe kao rezervoari koji privremeno usporavaju i skladište velike količine vode, čime se smanjuje opterećenje na prirodne vodotoke tijekom ekstremnih vremenskih uvjeta. Nakon određenog vremena, te vode se kontrolirano ispuštaju u prirodni ili regulirani vodotok, čime se sprječava preopterećenje i potencijalno oštećenje vodotoka.

Ukratko, oteretni kanali imaju ključnu ulogu u zaštiti od poplava, dok istovremeno njihova izgradnja i održavanje zahtijevaju pažljivo planiranje i dugoročnu brigu.



**Slika 13.** Oteretni kanal Sava-Odra koji štiti Zagreb i Veliku Goricu od velikih poplava [8]

### **2.3. Kanali za navodnjavanje**

Kanali za navodnjavanje predstavljaju ključnu infrastrukturu za upravljanje vodnim resursima u poljoprivredi. Dovodni kanali (glavni ili primarni) čine osnovnu mrežu koja prenosi vodu iz izvora poput rijeka, jezera ili rezervoara do sekundarnih kanala. Ovi sekundarni kanali, poznati i kao natapni kanali, dalje distribuiraju vodu izravno na poljoprivredne parcele.

Ovaj sustav omogućuje učinkovito korištenje vode, poboljšava prinose i pomaže očuvanju plodnosti tla. Također, navodnjavanje igra ključnu ulogu u područjima s niskim razinama padalina ili čestom sušom, omogućujući poljoprivrednicima bolju kontrolu nad svojim usjevima i optimizaciju proizvodnje hrane [1].

Glavni dovodni kanal, koji služi kao primarni kanal u sustavu za natapanje, obično se smješta uz obod brežuljaka, povišenih prirodnih lokacija ili uzdignutih nasipa.

Ovaj raspored omogućuje gravitacijsko vođenje vode prema kanalima drugog reda (sekundarnim i tercijarnim), koji distribuiraju vodu po poljoprivrednim parcelama. Duž glavnog kanala mogu se nalaziti i crpna postrojenja koja pomažu u usmjeravanju vode pod tlakom kad gravitacija sama ne može osigurati potrebnu distribuciju.

Za glavne dovodne kanale često se koristi trapezasti poprečni presjek, koji može biti jednostruki ili izlomljen, te može biti obložen ili neobložen. Oblaganje kanala ima nekoliko važnih funkcija: pomaže u sprečavanju gubitaka vode zbog infiltracije, osigurava stabilnost kosina omočenih površina, štiti dno i bokove kanala od erozije, te može povećati brzinu protoka vode i smanjiti presjek kanala. Oblaganje također može biti nužno za zaštitu okoliša od voda koje se filtriraju u podzemlje i mogu uzrokovati stvaranje bara u depresijama uz kanal [1].

U slučaju neobloženih kanala, posebno onih koji se nalaze u aluvijalnim materijalima, postoji visok rizik od erozije, što može zahtijevati dizajniranje kanala s blagim zavojima kako bi se smanjila brzina vode i minimizirali oštećenja. Radijusi zavoja u zemljanim kanalima ovise o nekoliko čimbenika, uključujući vrstu tla, brzinu protoka vode i ukupni kapacitet kanala.

Voda koja se koristi za natapanje može biti različitih izvora, uključujući čistu izvorsku vodu, vodu iz prirodnih i umjetnih jezera, podzemnu vodu, te riječnu vodu. Odabir izvora ovisi o dostupnosti vode i specifičnim potrebama sustava za navodnjavanje.



**Slika 14.** Kanal za navodnjavanje u Baranji, trenutačno najveći sustav za navodnjavanje u Hrvatskoj [9]

#### **2.4. Odvodni kanali**

Odvodni kanali služe za odvodnju poljoprivrednih površina, gdje višak vode prikuplja mreža kanala četvrtog reda i dalje usmjerava prema mreži kanala trećeg i drugog reda. Ova mreža kanala vodi vodu do glavnog kanala prvog reda, koji funkcionira kao primarni recipijent. U ovu skupinu spadaju i obodni ili lateralni kanali, koji sakupljaju vodu s područja izvan poljoprivrednih površina i štite ih od utjecaja vanjskih voda.

Glavni odvodni kanal za površinsku odvodnju projektira se tako da može obuhvatiti sve relevantne protjecaje koji dolaze iz nižih odvodnih kanala, uključujući one četvrtog i trećeg reda. Ovaj kanal ima ključnu ulogu u odvođenju oborinskih voda, kao i izvorskih i podzemnih voda koje ulaze u melioracijsko područje, usmjeravajući ih prema određenom recipijentu. U većini slučajeva, regulirani prirodni vodotok služi kao glavni recipijent za cijelo slivno, odnosno melioracijsko područje. Položaj i trasa glavnog odvodnog kanala pažljivo se usklađuju s karakteristikama glavnog recipijenta kako bi se osigurala optimalna funkcionalnost sustava [1].

Glavni odvodni kanali često koriste trapezasti poprečni presjek, koji može biti jednostruki ili izlomljen. Ovi kanali mogu imati vrlo blage nagibe kosina u usjeku, čime se smanjuje rizik od erozije i omogućuje dugotrajna stabilnost. Također, u praksi se primjenjuju i različiti



geometrijski profili, uključujući raščlanjene trapezne profile, kako bi se prilagodili specifičnim uvjetima terena i potrebama sustava.

Osnovne karakteristike za glavne odvodne kanale slične su onima za glavne natapne kanale. Važno je napomenuti da se često suočavamo s problemom osiguravanja protočnosti i stabilnosti omočenih neobloženih presjeka u tlu. Ovi problemi mogu nastati zbog poroznog tla, prekomjernog tlaka vode u tlu i pritiska strujanja u odnosu na razinu vode u kanalu..

Kada gravitacijska odvodnja unutarnjih voda nije moguća zbog visokih razina vode u glavnom recipijentu, koriste se crpne stanice. Iako ove stanice omogućuju učinkovito upravljanje vodama, njihova uporaba povećava troškove hidromelioracijskog sustava. Stoga je važno razmotriti i optimizirati sve aspekte sustava za navodnjavanje i odvodnju kako bi se postigla najbolja ravnoteža između troškova i učinkovitosti [1].

## **2.5. Plovni kanali**

Plovni kanali su umjetno stvorene vodne prometnice koje, zajedno sa svojim objektima i postrojenjima, omogućuju plovidbu. Usko su povezani s razvojem riječnih i vodnih putova, jer povezuju prirodne plovne rute, različita područja i riječni promet s morskim. Plovni kanali mogu biti spojni, obilazni ili prilazni, a njihova funkcija uključuje [1]:

- omogućavanje vodnog transporta između dviju točaka iste rijeke kada je taj dio rijeke neprikladan za plovidbu ili ga nije moguće koristiti.
- skraćivanje plovnog puta između dviju točaka na rijeci, jezeru ili moru (primjeri su Sueski i Panamski kanal).
- povezivanje područja koja nemaju vodnu komunikaciju s plovnim putem (primjer je kanal Tisa – Dunav dug 118 km).
- spajanje dvaju vodnih putova (primjer je kanal Erie između New Yorka i Buffala, koji spaja jezera s morem)
- korištenje kanala za industrijske, poljoprivredne i energetske svrhe

Izgradnja kanala zahtijeva značajna financijska ulaganja. Projektiranje kanala zahtijeva analizu mnogih tehničkih i gospodarskih čimbenika. Pri trasiranju kanala treba težiti najkraćem putu između dviju točaka, jer pravac predstavlja najkraći put s najmanjim troškovima izgradnje i eksploatacije, pod uvjetom da su terenski uvjeti jednaki. Svako

odstupanje od pravca povećava troškove investicije i transporta. Međutim, terenski uvjeti često variraju duž trase, što može uzrokovati prepreke. Stoga je važno pronaći najpovoljniju trasu s aspekta izgradnje i eksploatacije, te osigurati što jeftiniji pristup brodu, ukrcaj i iskrcaj [1].

S konstruktivnog stajališta, plovni kanali razlikuju se prema visinskim razlikama između krajnjih točaka i topografskim karakteristikama područja kroz koje prolaze. Ako razlika u visini između krajnjih točaka kanala nije velika i nema opasnosti od jakih struja, kanal ne zahtijeva prevodnice za brodove. Ako postoji značajna visinska razlika, koriste se prevodnice, specijalne brodske dizalice za svladavanje visinskih razlika na plovnim kanalima. Postavljaju se na krajnjim točkama kanala, veći broj ulaznih i izlaznih prevodnica uzduž kanala, ili niz prevodnica s tjemnom prevodnicom na vododjelnici (primjer su kanal Rajna - Majna - Dunav dužine 171 km). Kanali s tjemnom prevodnicom moraju osigurati sigurno snabdijevanje tjemene prevodnice.

U krivinama kanala, obale obično nisu paralelne, pa kanal treba proširiti kako bi se smanjio polumjer zakrivljenosti i olakšalo kretanje brodovima. Proširenje se obično izvodi na konveksnoj strani krivine kako bi se poboljšala preglednost. Oštre krivine treba izbjegavati, a polumjeri krivina ovise o tonaži brodova koji će koristiti kanal.

Obale kanala najčešće nisu obložene i moraju biti zaštićene od valova uzrokovanih brodovima i vjetrom. Za zaštitu se koriste kameni nabačaj u slojevima, obično u dva sloja različite granulacije.

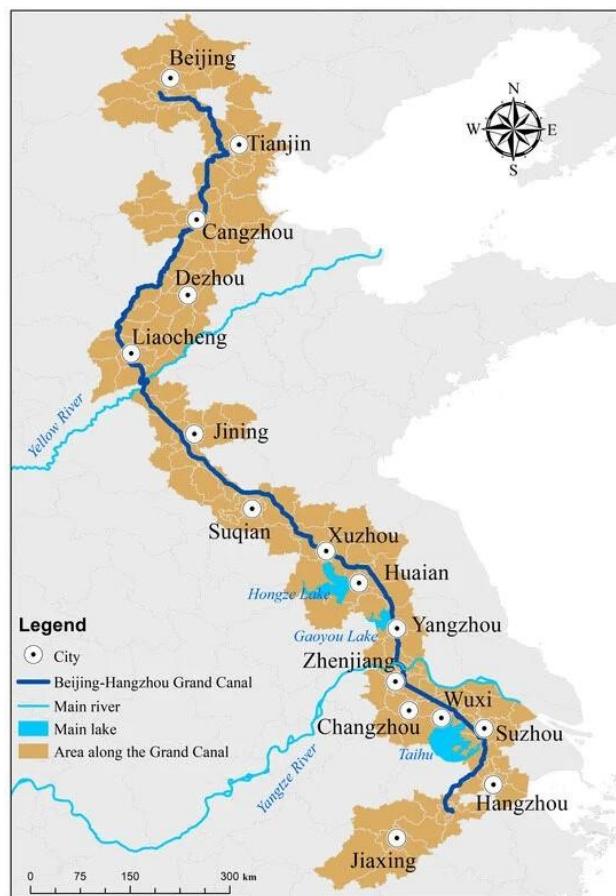
Potrebno je poznavati dominirajuće vjetrove (vjetrove s maksimalnim brojem dana) i vladajuće vjetrove (vjetrove s maksimalnim brzinama), uzduž trase kanala. Bilo bi najbolje kada bi oni djelovali poprečno na osovinu kanala. Za zaštitu od bočnog djelovanja vjetra koriste se bankine različite širine ili slobodne površine uzduž kanala sa sadnjom drvoreda.

Veličina poprečnog profila kanala ovisi o ekonomskim i pogonskim čimbenicima. Veći profil poboljšava pogon, ali povećava troškove izgradnje i eksploatacije. Izbor poprečnog presjeka ovisi o brzini i količini vode u kanalu, brzini kretanja broda i površini uronjenog dijela najvećeg broda [1].

Ukoliko je poprečni presjek kanala (širina i dubina) u odnosu na brod manji, utoliko je veći otpor kretanju broda. Također, otpor raste s povećanjem brzine broda. Utjecaj obala i dna na kretanje broda, poznat kao "otpor u ograničenom prostoru", također je bitan. Od dva poprečna

presjeka jednake omočene površine, povoljniji je onaj s manjom širinom i većom dubinom, jer prouzrokuje manji otpor. Najbolji poprečni presjek je pravokutni ili paraboličan, dok je trapezast najnepovoljniji zbog promjene omočene površine, iako je pogodan za polaganu vožnju.

Ušće kanala u rijeku treba biti na konkavnoj krivini kako bi se smanjilo zamuljivanje, a izlaz kanala je povoljniji ako je u smjeru toka rijeke, jer to smanjuje utjecaj matice rijeke na mirnu vodu u kanalu, što je važno za upravljanje brodovima [1].



**Slika 15.** Veliki kanal, Beijing-Hangzhou, najduži umjetni plovni kanal na svijetu dugačak oko 1.770 km [10]

## 2.6. Derivacijski kanali

Derivacijski kanali za dovod vode do hidroelektrana obično su umjetna otvorena korita pravilnog oblika izvedena u usjeku, nasipu ili zasjeku. Voda teče kroz njih gravitacijom (atmosferski tlak). Njihova svrha je da dovedu radnu vodu potrebnu za proizvodnju električne

energije do hidroelektrane. To su najjeftiniji od svih tipova derivacija. U slučajevima kada to uvjeti dozvoljavaju kanal treba pretpostaviti svim drugim oblicima dovoda vode [1].

Trasa kanala, od točke zahvata vode (ulazne građevine) do mjesta korištenja (čvora strojarnice), trebala bi ići što je moguće kraćim putem. Međutim, terenski, topografski, geološki, geotehnički i drugi uvjeti često otežavaju ostvarenje ovog cilja.

U pravilu treba izbjegavati nestabilne terene, strme padinske kosine, duboke usjeke i visoke nasipe. Poprečna korita bujica u odnosu na osovinu kanala, kao i drugi vodni tokovi koji presijecaju trasu kanala, mogu uvjetovati posebne umjetne objekte za propuštanje vode iznad (akvadukte) ili ispod kanala (sifone). Često se te vode uvode u kanal.

Prilikom izbora trase kanala neophodno je uspoređenje niza varijanti, s tim da se izabere varijanta trase kanala koja iziskuje najmanju vrijednost investicija, kako samog kanala tako i hidrotehničkih objekata na kanalu.

Geometrijske karakteristike kanala zavise o vrsti zemljišta i terena kroz koji će kanal prolaziti. Sitnozrna vodom zasićena tla, močvarna, barska i muljevita tla stvaraju velike poteškoće prilikom izrade kanala. Nemoguće je da se u takvim tlima održe strane kanala u nagibu [1].

Najpovoljniji poprečni presjek kanala je onaj koji ima minimalan hidraulički radijus. Kanali mogu imati različit oblik poprečnog presjeka. Najčešće se upotrebljava trapezni oblik iako je polukružni, hidraulički najpovoljniji. Trapezni oblik kanala može biti jednostruki (HE Senj), dvostruki (kanal Buško Blato - Lipa, HE Formin) i trostruki (HE Orlovac, kanal Brda – Lipa). Nagib kosina obloženih kanala ovisi o tipu i vrsti obloge [1].

Obloga derivacijskih energetske kanala ima sljedeće funkcionalne zadatke:

- smanjenje omočenog presjeka derivacijskog kanala
- povećanje protjecanje brzine smanjenjem koeficijenta trenja
- sprječavanje gubitka vode, povećanje vodonepropusnosti
- konsolidaciju omočene površine, povećanje stabilnosti kosina i dna
- povećanje mehaničke otpornosti na vodnu i abrazijsku eroziju

Obloga mora biti otporna na djelovanje uzgona, dinamičku seizmičku pobudu, biološku koroziju i probijanje raslinja, te na djelovanje leda i valova. Također, obloga treba biti trajna, pogodna za održavanje i rehabilitaciju, a oštećenja obloge trebaju se moći lako otkloniti. Uobičajeni materijali za oblogu uključuju drvene platice, ciglu, kamen, gabione, glinu,

plastične sintetičke folije, asfaltbeton i beton. Izbor tipa obloge ovisi o lokalnim uvjetima i cilju zaštite [1].

Optimalna površina protjecajnog presjeka određuje se ekonomskim proračunom, ali kod toga treba voditi računa i o drugim tehničkim čimbenicima. Naime, brzina u kanalu ne smije biti iznad granice koja izaziva oštećenje omočene kosine kanala ili u slučaju obloge njenu degradaciju. Odnos brzine na dnu i bokovima prema srednjoj brzini u profilu ovisi od oblika omočene površine i odnosa širine i dubine korita. Brzine vode u kanalima s oblogom su veće ako voda ne transportira nanos.

U kanalima za energetske svrhe da nije dopušteno primjenjivati ni suviše velike brzine, jer to uvjetuje povećanje pada i time energetske gubitke. S druge strane, najmanja dopuštena brzina u kanalu određuje se u ovisnosti o datim uvjetima, zamuljivanje i zarašćivanje kanala. Do toga obično dolazi za vrijeme dužeg trajanja malog opterećenja hidroelektrane.

Varijantnim izborom poprečnog presjeka kanala i hidrauličkim proračunom određuje se gubitak na padu i shodno tome gubitak na proizvodnji energije. Brzina tečenja, kod ekonomski najpovoljnijeg poprečnog presjeka, veća je u kanalima s oblogom nego u kanalima bez obloge. To je rezultat manje hrapavosti i većih troškova kod kanala s oblogom za isti presjek. Izborom optimalne površine proračunom se dolazi do ekonomične brzine vode u derivacijskom kanalu. Kod velikih dužina kanala, gdje se nagib kanala, njegova širina i dubina mijenjaju, gdje se također mijenjaju i geotehničke karakteristike, kanal treba podijeliti u dionice približno jednakih karakteristika i za svaku dionicu provesti energetska ekonomsku analizu [1].



**Slika 16.** Derivacijski kanal Buško Blato u BiH [11]

Hidroelektrane mogu biti smještene na kraju kanala ili na samom kanalu. Ukoliko su hidroelektrane smještene na kanalu tada se radi o protočnim hidroelektranama s malom promjenom ili bez promjene razine vode u kanalu. Hidroelektrane na kraju kanala mogu imati složenije pogonske manevre, ovisno od zahtjeva energetskeg sustava kojem pripadaju. Derivacijski kanal se u tom slučaju završava objektom koji se zove gravitacijska vodna komora. Na prilazu vodnoj komori kanal se obično širi. Iz vodne komore izlaze tlačne cijevi ili dovodi pod tlakom do turbina [1].

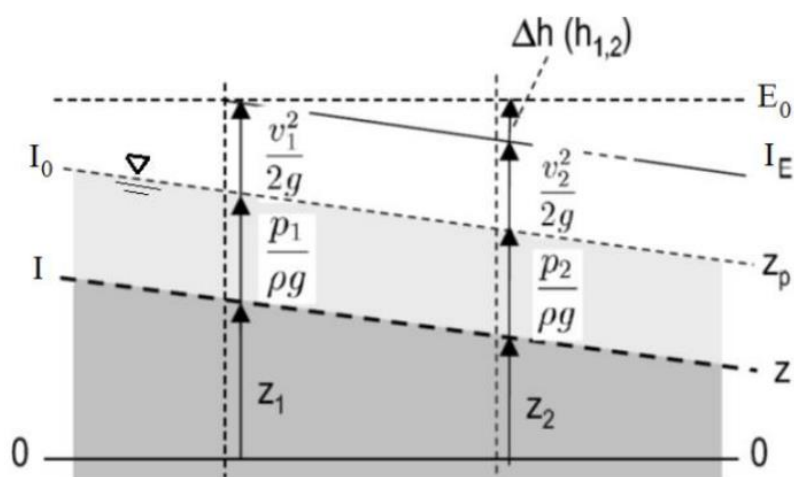
Ponekad se uzduž dugih derivacijskih kanala i na vodnim komorama predviđaju preljevi ili evakuacijski objekti za preusmjeravanje dijela protjecaja izvan kanala ili pored hidroelektrane u rijeku. U tom slučaju treba obratiti pažnju na energiju vode koja se prelijeva ili ispušta.

### 3. Osnove proračuna

Tečenje u otvorenim koritima predstavlja najčešći izazov s kojim se hidrotehničari suočavaju. Ovo uključuje tečenje u prirodnim vodotocima (kao što su uspori u akumulacijama, pronos nanosa i zagađivala), strujanje u umjetno izgrađenim kanalima za navodnjavanje i odvodnjavanje, kao i u kanalizacijskim sustavima. Ovaj oblik strujanja bio je jedan od prvih s kojima su se hidrotehničari susretali.

Kod hidrauličkog proračuna kanala konstantnog protoka pretpostavlja se jednoliko tečenje sa slobodnim vodnim licem. Ovaj oblik tečenja može se pojaviti samo u prizmatičnim kanalima, tj. u koritima s konstantnim padom i stalnim poprečnim presjekom. Uz stalnost površine i protoka očekuje se i nepromijenjen profil brzina [4].

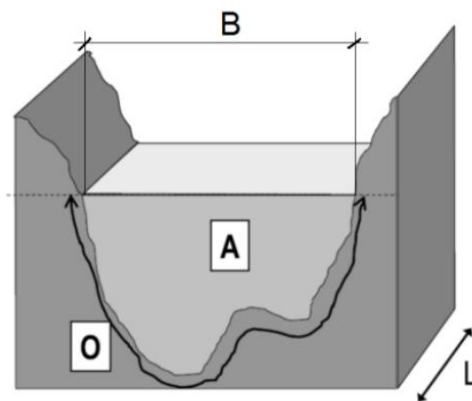
Strujanje s slobodnim vodnim licem, tj. slobodnom površinom, odnosi se na strujanje gdje je granična ploha tekućine i plina (zraka) slobodna i izložena istom (atmosferskom) tlaku. Na slobodnoj površini, hidrostatski tlak je u ravnoteži s atmosferskim tlakom, što znači da je piezometarska linija jednaka liniji slobodne površine tekućine. Energetska linija je iznad piezometarske linije za  $\frac{v^2}{2g}$ , gdje  $v$  predstavlja brzinu tekućine, a  $g$  ubrzanje zbog gravitacije.



Slika 17. Energetska linija [4]

Kod jednolikog tečenja, hidrauličke karakteristike toka ostaju jednake duž cijelog njegova toka, uključujući presjek toka, nagib dna i koeficijent trenja. U takvim uvjetima, protok i srednja brzina su konstantni. Energetska linija postaje paralelna sa slobodnom površinom i dnom korita, što znači da su padovi, srednje brzine i proticajni presjeci međusobno jednaki:

$$I = I_0 = I_E ; v_1 = v_2 = v ; A_1 = A_2 = A ; Q = const.$$

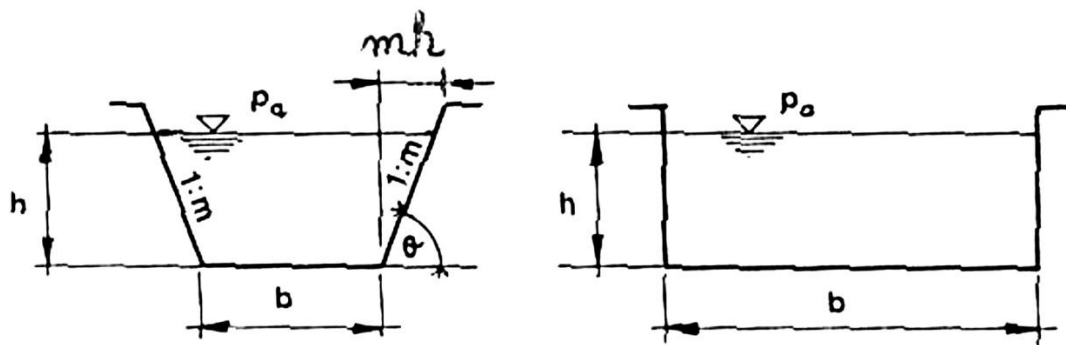


**Slika 18.** Omočeni obod i protjecanja površina u presjeku [4]

Forma proticajnog presjeka igra ključnu ulogu u tečenju s slobodnim vodnim licem, budući da se na mjestu kontakta tekućine i konture korita pojavljuje izvor izmjene količine gibanja u obliku posmičnih naprezanja. Gubitak energije kod tečenja sa slobodnim vodnim licem nastaje uslijed trenja, a računa se prema analognom izrazu za linijski gubitak osim što se umjesto promjera cjevovoda ovdje koristi parametar hidraulički radijus  $R$ . Hidraulički radijus se definira kao omjer protjecajne površine  $A$  [ $m^2$ ] i omočenog oboda  $O$  [ $m$ ], koji predstavlja liniju kontakta između tekućine i provodnika [4]:

$$R = \frac{A}{O} ; [m]$$





Slika 19. Trapezni i pravokutni profil kanala [2]

Za kanale trapezastog oblika osnovni geometrijski elementi jesu:

- protjecajna površina,  $A = h(b + mh)$
- omočeni obod,  $O = b + 2h \sqrt{1 + m^2}$
- hidraulički radijus,  $R$
- nagib pokosa (kosine),  $m = ctg\theta$

gdje je  $h$  [m] – dubina vode,  $\theta$  [°] - kut nagiba kosine prema horizontali

Ako pretpostavimo da je  $A = const$ , minimalni hidraulički gubici pada u kanalu su za  $O \rightarrow min$ , što odgovara odnosu:

$$\frac{b}{h} = 2 \left( \sqrt{1 + m^2} - m \right)$$

odnosno hidrauličkom radijusu:

$$R = 0.5 h$$

### 3.1. Proračun tečenja u kanalu

Bernoullijeva jednadžba izražava zakon očuvanja energije i u slučaju stacionarnog strujanja tekućine navodi da jedinica mase tekućine (odnosno njezin diferencijalni dio) održava konstantnu ukupnu energiju duž cijelog toka strujanja [4]:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \Delta H \qquad \Delta H = k \frac{L}{R} \frac{\alpha v_2^2}{2g}$$

$k$ - koeficijent otpora tečenju uslijed trenja

Ako je  $\Delta H = I_E \times L$ , onda se preslaganjem gornjeg izraza za brzinu dobiva:

$$v = \sqrt{\frac{2g}{k}} \sqrt{RI_E}$$

Ako se označi  $C = \sqrt{\frac{2g}{k}}$  dobije se Chezyjeva formula za brzinu toka sa slobodnim vodnim licem:

$$v = C \sqrt{RI_E}; [m/s]$$

Chezy je smatrao da svakom koritu odgovara neka konstanta  $C$ , kasnije se točnijim mjerenjima pokazalo da to ne može biti konstanta za pojedini poprečni presjek. S obzirom da on ovisi o Reynoldsovom broju i koeficijentu hrapavosti, nije moguće pronaći neku jednostavnu zakonitost koja bi vrijedila općenito za sve oblike korita.

Usljedila je "poplava" formula za određivanje Chezyjevog broja, a od svih povijesnih formula najčešće je u primjeni Manningova formula (1889.):

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I_E^{\frac{1}{2}}$$

gdje je  $n$  koeficijent hrapavosti korita,  $R$  hidraulički radijus i  $I_E$  nagib linije energije (nagib dna kanala).

Recipročna vrijednost koeficijenta hrapavosti  $k_s = \frac{1}{n}$  koja je mjera glatkosti korita, koristi se pod imenom Stricklerov koeficijent brzine pa se i Manningova formula ubrzo napisala kao:

$$v = k_s R^{\frac{2}{3}} I_E^{\frac{1}{2}}$$

naziva se Manning-Stricklerova formula.

Protok kanala sada možemo napisati u obliku:

$$Q = v A = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I_E^{\frac{1}{2}} A = k_s R^{\frac{2}{3}} I_E^{\frac{1}{2}} A ; [m^3/s]$$

**Tablica 2.** Manningova hrapavost korita [12]

| Kateg.      | VRSTA STIJENKI   | <i>n</i>    | $K_s=1/n$ |
|-------------|--|-------------|-----------|
| <b>I</b>    | Osobito glatke površine – emajlirane ili glazirane   | 0.009       | 111       |
| <b>II</b>   | Vrlo dobro blanjane daske, dobro sastavljene; najbolja zaglađena cementna žbuka  | 0.010       | 100       |
| <b>III</b>  | Najbolja cementna žbuka (1/3 pijeska); cijevi od lijevanog željeza; dobro sastavljene željezne cijevi                              | 0.011       | 90.9      |
| <b>IV</b>   | Vodovodne cijevi u normalnim okolnostima, bez veće inkrustacije; vrlo čiste cijevi za otpadnu vodu i vrlo dobar beton              | 0.012       | 83.3      |
| <b>V</b>    | Drvena obloga dobro obrađena; dobra obloga od opeke; cijevi za otpadnu vodu; ponešto nečiste vodovodne cijevi                      | 0.013       | 76.9      |
| <b>VI</b>   | Zaprljane cijevi (vodovodne i za otpadnu vodu); betonirani kanali u osrednjem stanju   | 0.014       | 71.4      |
| <b>VII</b>  | Srednje dobra obloga od opeke; tarac od klesanog kamena u srednjem stanju; dosta zaprljane cijevi za otpadnu vodu                  | 0.015       | 66.7      |
| <b>VIII</b> | Dobar tarac od lomljenog kamena; stara (oštećena) obloga od kamena; relativno grub beton   | 0.017       | 58.8      |
| <b>IX</b>   | Kanali pokriveni debelim stabilnim slojem mulja; kanali u zbijenom sitnom šljunku s neprekidnim tankim slojem mulja                | 0.018       | 55.6      |
| <b>X</b>    | Srednje dobar tarac od lomljena kamena; tarac od oblutka; kanali usječeni u kamenu, pokriveni tankim muljem                        | 0.020       | 50.0      |
| <b>XI</b>   | Kanali u zbijenoj glini, lesu, šljunku i zemlji, pokriveni isprekidano tankim slojem mulja; veliki zemljani kanali u dobrom stanju | 0.022       | 44.4      |
| <b>XII</b>  | Veliki zemljani kanali srednje održavanosti; rijeke (čisto pravolinijsko korito bez urušavanja obala)                              | 0.025       | 40.0      |
| <b>XIII</b> | Zemljani veliki kanali u nešto slabijem stanju i mali kanali u srednjem stanju   | 0.027       | 36.4      |
| <b>XIV</b>  | Zemljani kanali u slabom stanju (šaš, oblutice ili šljunak na dnu) ili prilično zarasli travom i s odronjavanjem obala             | 0.030       | 33.3      |
| <b>XV</b>   | Kanali s nepravilnim profilom, prilično zatrpani kamenom ili obrasli; rijeke u relativno dobrom stanju, s nešto kamena i šaši      | 0.035       | 28.6      |
| <b>XVI</b>  | Kanali u veoma lošem stanju; rijeke s većom količinom kamena i šaši, vijugavim koritima i pojavom plicaka                          | $\geq 0.04$ | $\leq 25$ |

### 3.2. Specifična energija vodotoka

Ukupna (mehanička) energija koju posjeduje jedinična masa tekućine mjerena od dna vodotoka, naziva se specifična energija. U otvorenim vodotocima, specifična energija uključuje kinetičku energiju i potencijalnu energiju te glasi:

$$H = y + \frac{\alpha v^2}{2g}$$

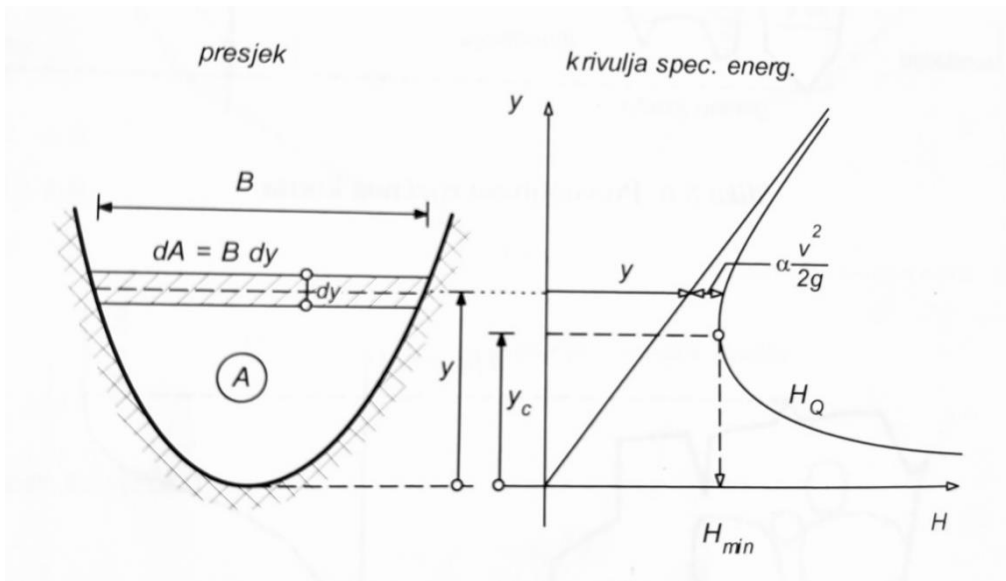
gdje je:

- $v$  = brzina tekućine [ $m/s$ ]
- $g$  = ubrzanje zbog gravitacije [ $m/s^2$ ]
- $y$  = visina tekućine iznad referentne ravnine [ $m$ ]
- $\alpha$  = Coriolissov koeficijent (za otvorene tokove kreće između 1.0 i 1.1 pa ga često ne treba uvoditi u račun)

Elementi Specifične Energije:

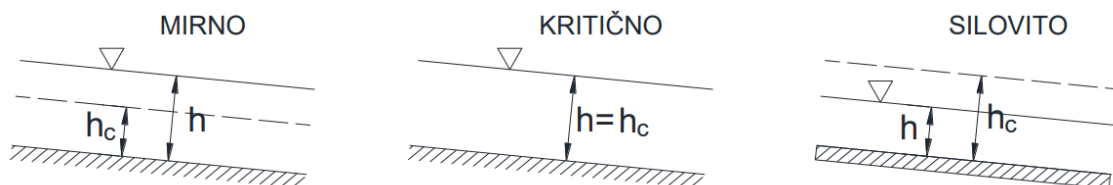
- kinetička energija:  $\frac{v^2}{2g}$
- potencijalna energija:  $y$

Specifična energija presjeka se računa za različite dubine toka  $h$ , pri čemu se protok drži konstantnim. Iz dobivenih rezultata se crta krivulja specifične energije presjeka [4].



**Slika 20.** Specifična energija u presjeku korita [4]

Dubina vodotoka  $y_c$  ( $h_c$ ) pri kojoj je specifična energija presjeka minimalna poznata je kao kritična dubina. Kada je tok vode u toj dubini, on se naziva kritični tok. Ako je dubina vode veća od kritične, brzina protoka je mala, prevladava potencijalna energija tekućine, i takav tok se opisuje kao mirni tok. S druge strane, ako je dubina manja od kritične, brzina protoka je visoka i dominira kinetička energija tekućine, što se naziva siloviti tok [4].



**Slika 21.** Tipovi toka s obzirom na kritičnu dubinu [4]

### 3.3. Freudov broj

Postupak određivanja kritične dubine očitanjem minimuma specifične energije iz nacrtanog grafa nije dovoljno točan, te se stoga postavlja analitički kriterij za minimum specifične energije [1]:

$$\frac{dH}{dy} = \frac{d}{dy} \left( y + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2} \right) = 0$$

iz čega piše:

$$1 - \alpha \frac{Q^2}{gA^3} \frac{dA}{dy} = 0$$

Derivacija površine presjeka po dubini jednaka je širini vodnog lica:

$$\alpha \frac{Q^2}{2gA^3} = 1$$

Dobiveni izraz je kriterij za kritično strujanje koji se naziva Freudov broj:

$$F = \alpha \frac{Q^2}{gA^3} B \quad \text{odnosno} \quad F = \alpha \frac{v^2}{g \frac{A}{B}} = \alpha \frac{v^2}{gy}$$

gdje je  $y = \frac{A}{B}$  srednja dubina koja odgovara pravokutnom presjeku širine  $B$  i jednake površine  $A$ . U jednostavnim poprečnim presjecima za Coriolisov broj se može uzeti jedinica, tako da Freudov broj ima oblik:

$$F = \frac{v^2}{gy}$$

Prema prikazanom, vrsta toka određena je Freudovim brojem:

$F < 1$  - miran tok, razmjerno male brzine

$F > 1$  - siloviti tok, razmjerno velike brzine

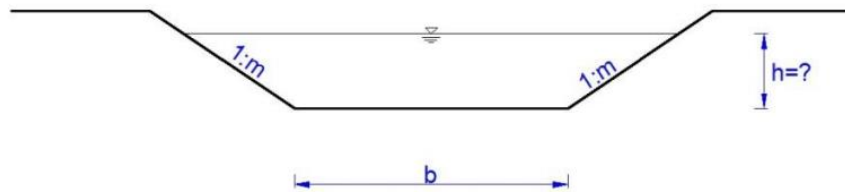
$F = 1$  - kritično stanje



#### 4. Primjer proračuna

Potrebno je dimenzionirati zemljani kanal trapeznog poprečnog presjeka duljine 2900 metara, pad dna kanala je  $I = 1,50 \text{ ‰}$ . Pretpostavljeni projektirani protok iznosi  $36 \text{ m}^3/\text{s}$ .

S obzirom na projektirani protok  $36 \text{ m}^3/\text{s}$  te kanal od zemljanog materijala u kojem bi brzine vode trebale biti relativno male pretpostavit ćemo kanal malo većih dimenzija s blažim nagibom bočnih stranica. Odnosno širinu dna kanala 4 metra i nagib 1: 1,50 ( $\theta = 33,69^\circ$ ).te vidjeti je li to zadovoljava naše potrebe. Manningov koeficijent hrapavosti za zemljani materijal iznosi 0,022.



Slika 22. Poprečni profil trapeznog kanala

Tražimo odgovarajuću dubinu vode  $h$ :

$$A = \frac{(b + b + 2mh)h}{2} = h(b + mh)$$

Omočeni obod:

$$O = b + 2h\sqrt{1 + m^2}$$

Hidraulički radijus:

$$R = \frac{A}{O}$$

Manningova formula za brzinu:

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}$$

Protok:

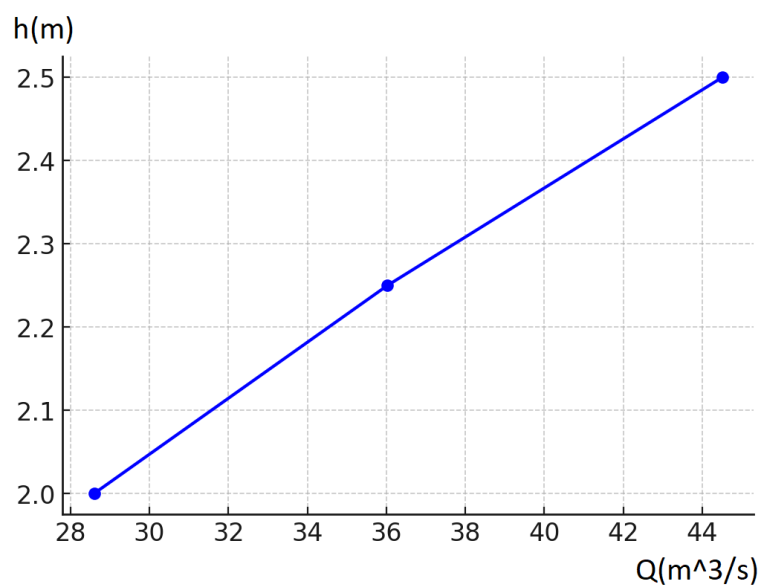
$$Q = vA = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} A ; R \text{ i } A \text{ ovise o } h$$

Iterativni postupak:

**Tablica 3.** Iterativni postupak

| $h[m]$ | $A[m^2]$ | $O[m]$ | $R[m]$ | $Q[m^3/s]$ |
|--------|----------|--------|--------|------------|
| 2      | 14       | 11,21  | 1,25   | 28,6       |
| 2,25   | 16,59    | 12,11  | 1,37   | 36,02      |
| 2,5    | 19,38    | 13,01  | 1,49   | 44,51      |

**Grafikon 1.** Krivulja protoka



Očitano:  $h = 2,25 [m]$

Određivanje kritične dubine i minimalne energije za zadani protok od  $36 \text{ m}^3/\text{s}$  :

$$E = h + \frac{v^2}{2g} = h + \frac{Q^2}{2gA^2}$$

Freudov broj:

$$Fr^2 = \frac{Q^2}{gA^3} B$$

$$A = h(b + mh)$$

$$B = b + 2mh$$

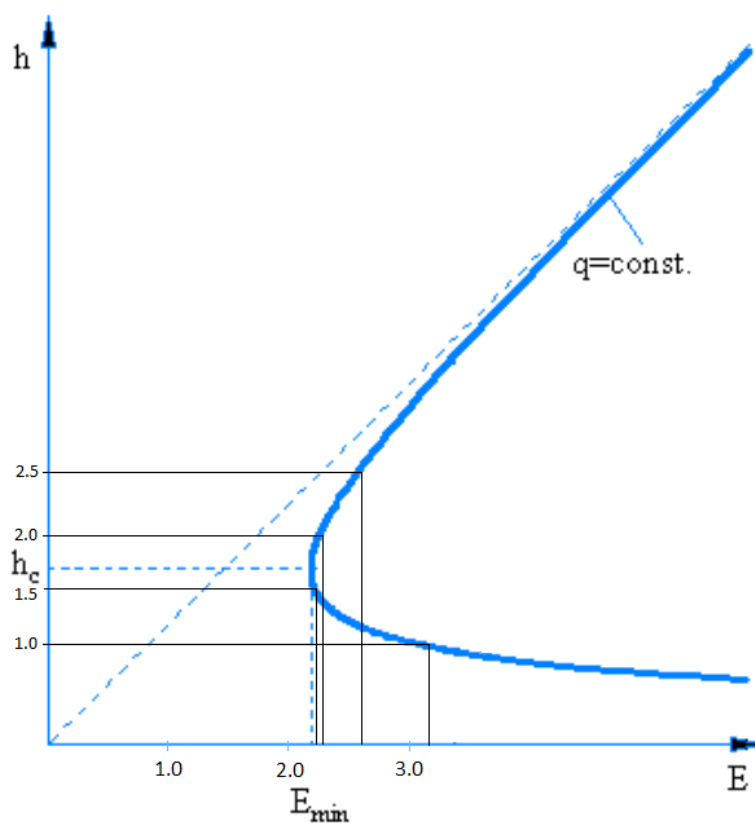
Za odabrane vrijednosti  $h$  računa se  $E$ :

**Tablica 4.** Izračun specifične energije

| $h$ [m] | $B$ [m] | $A$ [m <sup>2</sup> ] | $E$ [m] | $Fr^2$ |
|---------|---------|-----------------------|---------|--------|
| 1       | 7       | 5,5                   | 3,18    | 5,55   |
| 1,2     | 7,6     | 6,96                  | 2,56    | 2,97   |
| 1,5     | 8,5     | 9,38                  | 2,25    | 1,36   |
| 1,6     | 8,8     | 10,24                 | 2,23    | 1,08   |
| 1,7     | 9,1     | 11,14                 | 2,24    | 0,87   |
| 1,8     | 9,4     | 12,06                 | 2,25    | 0,71   |
| 2       | 10      | 14                    | 2,34    | 0,48   |
| 2,2     | 10,6    | 16,06                 | 2,46    | 0,34   |
| 2,5     | 11,5    | 19,38                 | 2,68    | 0,21   |

Iz krivulje specifične energije očitani su kritična dubina i minimalna energija:

**Grafikon 2.** Krivulja specifične energije



Očitano  $h_c = 1,65 \text{ m}$  ;  $E_{min} = 2,22 \text{ m}$

$v(h = 1,65) = 1,9 \text{ m/s}$

Odabrani trapezni profil kanala širine dna 4 metra i nagiba bočnih stranica 1:1,50 zadovoljava potrebe projektiranog protoka.

## 5. Zaključak

U ovom radu su obrađeni ključni aspekti hidrotehničkih kanala, počevši od osnovnih informacija o njihovoj svrsi i funkciji, preko različitih vrsta kanala prema namjeni, do osnovnih metoda proračuna i praktičnog primjera. Kroz analizu općeg pregleda hidrotehničkih kanala, jasno je da oni igraju ključnu ulogu u upravljanju vodama, odvodnji, navodnjavanju i prevenciji poplava.

Različite vrste hidrotehničkih kanala, kao što su kanali za odvodnju, kanali za navodnjavanje, plovni i derivacijski kanali, pokazuju različite zahtjeve i namjene koje odražavaju specifične potrebe i izazove u upravljanju vodama. Svaka vrsta kanala ima svoje specifične karakteristike i zahtjeve, što zahtijeva precizno planiranje i dizajn.

Osnove proračuna kanala, uključuju razmatranje hidrauličkih principa, protoka vode, kapaciteta i materijala pomoću kojih se projektiraju kanali. Kroz primjer proračuna, pokazano je kako se teorijski principi primjenjuju u praksi, naglašavajući važnost točnih proračuna za uspješno projektiranje i izgradnju kanala.

U zaključku, hidrotehnički kanali su neophodni za održivo upravljanje vodnim resursima, a njihovo pravilno projektiranje, izgradnja i održavanje ključni su za postizanje željenih rezultata u različitim aplikacijama. Budući razvoj tehnologija i metoda u ovom području može unaprijediti učinkovitost kanala i prilagoditi ih novim izazovima u upravljanju vodama.

## 6. Literatura

### 6.1. Popis izvora

- [1] P. Stojić, "Hidrotehničke građevine", Građevinski fakultet, Sveučilište u Splitu, 1998.
- [2] HG skripta, [https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4904159/mod\\_resource/content/9/HG\\_2017.pdf](https://moodle.srce.hr/2020-2021/pluginfile.php/4904159/mod_resource/content/9/HG_2017.pdf)
- [3] V. Jović, "Osnove hidromehanike", Građevinski fakultet, Sveučilište u Splitu, 2006.
- [4] G. Lončar, V. Andročec, Mehanika tekućina, skripta iz kolegija Mehanikatekućina, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2010.
- [5] "Gabion channel lining", [gabionpros.com/gabion-channel-lining](http://gabionpros.com/gabion-channel-lining)
- [6] "Geomembrane liners", <https://www.geosolutionsinc.com/products/stormwater-containment/hdpe-geomembrane-liners>
- [7] Novelacija PP i ideje dokumentacije VKDS, knjiga D1: Idejno rješenje kanala i vodnih građevina, prosinac 2006., BR. PROJEKTA 120 – S – 233
- [8] [portal.hr](http://portal.hr), Izvor: Pixsell / Autor: I. Soban
- [9] Puštanje je u rad sustav za natapanje "Baranja", izvor: [Voda.hr](http://Voda.hr)
- [10] "Veliki kanal", [wikipedia.org](http://wikipedia.org)
- [11] "CS Buško Blato", <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-jug/cs-busko-blato/1553>
- [12] Praktikum iz hidraulike, [https://www.grad.unizg.hr/\\_download/repository/V01-Nejednoliko\\_tecenje%5B1%5D.pdf](https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/V01-Nejednoliko_tecenje%5B1%5D.pdf)

## 6.2. Popis slika

|  |    |
|--|----|
| <b>Slika 1.</b> Izvedbe kanala na padini [2].....  | 6  |
| <b>Slika 2.</b> Oblici poprečnih profila kanala [2] .....  | 6  |
| <b>Slika 3.</b> Načini izvedbe kanala [2] .....  | 8  |
| <b>Slika 4.</b> Trapezni raščlanjeni profil kanala [2].....  | 9  |
| <b>Slika 5.</b> Vektori brzina i strujna mreža filtracije po poprečnom presjeku [2] .....                                | 13 |
| <b>Slika 6.</b> Gabionska obloga [5].....  | 15 |
| <b>Slika 7.</b> Asfaltbetonska obloga [2].....   | 15 |
| <b>Slika 8.</b> Klasična betonska obloga [2] .....   | 16 |
| <b>Slika 9.</b> Armiranobetonska obloga [2] .....  | 17 |
| <b>Slika 10.</b> Primjeri instalacije drenažnih sustava [2].....   | 18 |
| <b>Slika 11.</b> Obloga od plastične sintetičke folije [6].....  | 19 |
| <b>Slika 12.</b> Prikaz rasporeda ključnih hidrotehničkih građevina u višenamjenskom kanalu Dunav-Sava [7] .....         | 21 |
| <b>Slika 13.</b> Oteretni kanal Sava-Odra koji štiti Zagreb i Veliku Goricu od velikih poplava [8]                       | 24 |
| <b>Slika 14.</b> Kanal za navodnjavanje u Baranji, trenutačno najveći sustav za navodnjavanje u Hrvatskoj [9] .....      | 26 |
| <b>Slika 15.</b> Veliki kanal, Beijing-Hangzhou, najduži umjetni plovni kanal na svijetu dugačak oko 1.770 km [10] ..... | 29 |
| <b>Slika 16.</b> Derivacijski kanal Buško Blato u BiH [11].....  | 32 |
| <b>Slika 17.</b> Energetska linija [4].....  | 33 |
| <b>Slika 18.</b> Omočeni obod i protjecanja površina u presjeku [4].....   | 34 |
| <b>Slika 19.</b> Trapezni i pravokutni profil kanala [2].....  | 35 |
| <b>Slika 20.</b> Specifična energija u presjeku korita [4] .....   | 40 |
| <b>Slika 21.</b> Tipovi toka s obzirom na kritičnu dubinu [4].....   | 40 |
| <b>Slika 22.</b> Poprečni profil trapeznog kanala .....  | 43 |

## 6.3. Popis tablica

|   |    |
|---|----|
| <b>Tablica 1.</b> Preporučljive srednje brzine u kanalima u ovisnosti o dubini vode [2] ..... | 12 |
| <b>Tablica 2.</b> Manningova hrapavost korita [12] .....                                      | 38 |
| <b>Tablica 3.</b> Iterativni postupak .....   | 44 |
| <b>Tablica 4.</b> Izračun specifične energije .....   | 45 |

## 6.4. Popis grafikona

|  |    |
|--|----|
| <b>Grafikon 1.</b> Krivulja protoka.....             | 44 |
| <b>Grafikon 2.</b> Krivulja specifične energije..... | 46 |