

Hidrotehnički tuneli

Radovčić, Viktorija

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:237:112925>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-30**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Viktorija Radovčić

HIDROTEHNIČKI TUNELI

ZAVRŠNI ISPIT

Zagreb, 2024



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Viktorija Radovčić

HIDROTEHNIČKI TUNELI

ZAVRŠNI ISPIT

Eva Ocvirk

Zagreb, 2024



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Viktorija Radovčić

HIDROTEHNIČKI TUNELI

FINAL EXAM

Eva Ocvirk

Zagreb, 2024



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Student/ica :

(Ime i prezime)

(JMBAG)

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

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

(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:

Mentor:

Potpis mentora:

Eva Ocvirk

Digitally signed by Eva Ocvirk
Date: 2024.09.17 10:21:17
+02'00'

Komentor:



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

Viktorija Radović, 0082065877

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio završnog ispita pod naslovom:

Hidrotehnički tuneli

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

17.9.2024.

Potpis:

R.



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA ZAVRŠNOG ISPITA

Ja :

Viktorija Radovčić, 81442441104

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela završnog ispita i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela završnog ispita pod naslovom:

Hidrotehnički tuneli

(Naslov teme završnog ispita na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom prijediplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

Eva Ocvirk

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

24.09.2024.

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio završnog ispita bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

17.09.2024.

Potpis:

VR

SAŽETAK

Ovaj završni rad bavi se hidrotehničkim tunelima, s posebnim naglaskom na njihovu primjenu u upravljanju vodnim tokovima i zaštiti gradilišta od poplava. U uvodnom dijelu rada obrađene su opće karakteristike tunela kao što su namjeni, poprečni profil, uzdužni pad nivelete, obloge...

Središnji dio rada posvećen je podjeli tunela prema uvjetima tečenja. Objašnjene su osnovne kategorije, kao što su tečenje sa slobodnim vodnim licem, tečenje s promjenjivim režimom tečenja i tečenje pod tlakom, te kako utječu na projektiranje tunela.

U završnom dijelu rada dan je primjer proračuna i dimenzioniranja obilaznog tunela za zaštitu gradilišta od vode. Proračun uključuje određivanje potrebnog promjera tunela te visine uzvodnog zagata kako bi se zadovoljili postojeći uvjeti tečenja. Proračun se temelji na tehničkim normama i standardima, s ciljem osiguravanja sigurnosti i stabilnosti konstrukcije. Ovaj rad naglašava važnost pravilnog projektiranja tunela kako bi se osigurala njihova funkcionalnost i sigurnost u hidrotehničkim projektima.

Ključne riječi: hidrotehnički tuneli; tečenje; tlak; obilazni tunel

SUMMARY

This thesis focuses on hydraulic tunnels, with special emphasis on their application in managing water flows and protecting construction sites from flooding. The introductory section covers the general characteristics of tunnels, such as their purpose, cross-section profile, longitudinal slope, lining, and more.

The central part of the thesis is dedicated to the classification of tunnels based on flow conditions. The main categories, such as free-surface flow, flow with variable regimes, and pressurized flow, are explained, along with how these conditions influence tunnel design.

In the final part of the thesis, a concrete example of the calculation and dimensioning of a bypass tunnel for the protection of a construction site from water is provided. The calculation includes determining the required tunnel diameter and the height of the upstream cofferdam to meet the existing flow conditions. The design is based on technical standards and norms, aiming to ensure the safety and stability of the structure. This thesis highlights the importance of proper tunnel design to ensure their functionality and safety in hydraulic engineering projects.

Key words: Hydraulic tunnels; flow; pressure; bypass tunnel

SADRŽAJ

ZAHVALE	Error! Bookmark not defined.
SAŽETAK	ii
SUMMARY	iii
SADRŽAJ	iv
1. UVOD	5
2. OPĆENITO O HIDROTEHNIČKIM TUNELIMA	8
2.1. Općenito	8
2.1.1. Namjena.....	8
2.1.2. Trasa.....	10
2.1.3. Poprečni profil	10
2.1.4. Uzdužni pad i niveleta.....	11
2.1.5. Obloga.....	11
3. TUNELI PREMA UVJETIMA TEČENJA.....	14
3.1. Tuneli sa slobodnim vodnim licem	14
3.1.1. Karakteristični poprečni profili	15
3.1.2. Hidraulički proračun	16
3.2. Tuneli pod tlakom	18
3.2.1. Karakteristični poprečni profili	21
3.2.2. Hidraulički proračun	22
3.3. Tuneli s promjenjivim režimom tečenja	25
4. PRIMJER PRORAČUNA.....	27
4.1. Proračun za uvjete tečenja sa slobodnim vodnim licem	27
4.2. Proračun za uvjete tečenja pod tlakom.....	30
5. ZAKLJUČAK	32
POPIS LITERATURE	33
POPIS SLIKA	35
POPIS TABLICA.....	36

1. UVOD

Tema završnog rada su hidrotehnički tuneli. Općenito, tunel je uređen prokop cjevasta oblika kroz tlo ili stijenu kojim se svladava prirodna prepreka i skraćuje duljina puta. Hidrotehnički tuneli su linijski sustavi za prostorni raspored vode, za dovod i odvod vode u hidroelektranama, vodovodima, kanalizacijama ili pri melioraciji. Kao i sve tunele karakterizira ih barem dva puta veća dužina od širine prolaza. Razlikujemo hidrotehničke tunele za navodnjavanje, odvodnju, drenažu, kanalizaciju, obilazne tunele, plovne tunele... Hidrotehnički se tuneli prema načinu tečenja dijela na one sa slobodnim vodnim licem, tlačne tunele i tunele s promjenjivim režimom tečenja. U radu su prikazane osnove proračuna te primjer kratkog proračuna hidrotehničkog tunela.

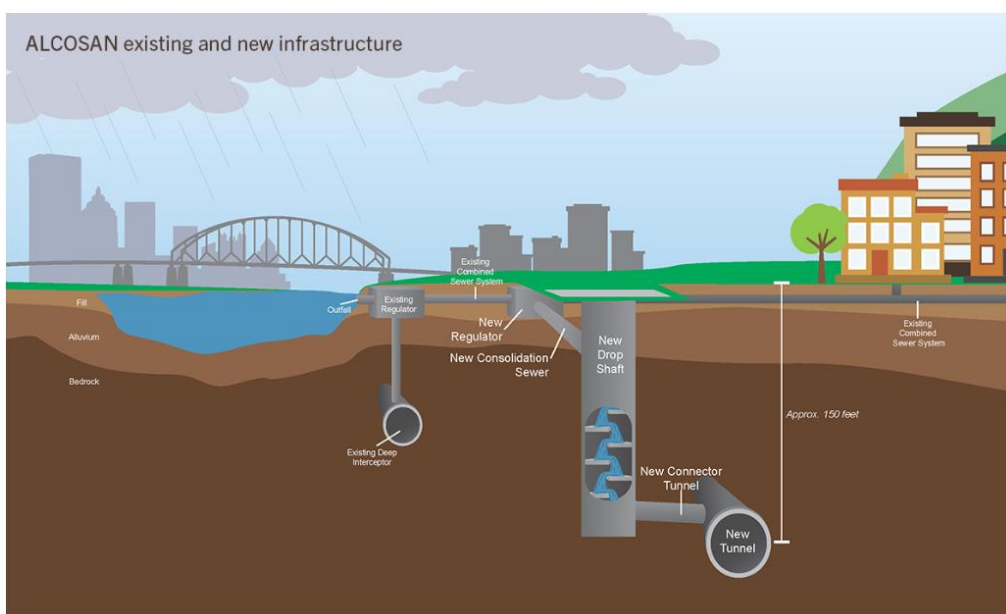


Slika 1: Primjer hidrotehničkog tunela(Izvor: [12])

Hidrotehnički tuneli imaju važnu ulogu u modernoj infrastrukturi otoka, omogućujući neometanu opskrbu vodom, odvodnju otpadnih voda te sprječavanje zagađenja okoliša,

posebno mora. Zbog svog specifičnog geografskog položaja i ograničenih resursa, otoci se suočavaju s posebnim izazovima u osiguravanju stabilne i sigurne vodoopskrbe.

Hidrotehnički tuneli predstavljaju efikasno rješenje za transport vode iz izvora do potrošača, osiguravajući kontinuiranu dostupnost pitke vode. Jednako tako, adekvatna odvodnja otpadnih voda putem ovih tunela igra vitalnu ulogu u zaštiti okoliša. Sprječavanjem nepročišćenog ispuštanja otpadnih voda u more, tuneli doprinose očuvanju čistoće mora i zaštiti morskih ekosustava. Time se ne samo održava ekološka ravnoteža, već se i čuva turistički potencijal otoka, koji je nerijetko osnovni izvor prihoda za lokalno stanovništvo. Stoga, razumijevanje projektiranja i održavanja hidrotehničkih tunela postaje ključno za osiguranje njihove dugoročne funkcionalnosti i učinkovitosti.



Slika 2: Primjer infrastrukture hidrotehničkog tunela koji služi za opskrbu vode grada Pittsburgh, USA (Izvor: [4])

Kao osoba koja živi uz more, a potječe s otoka, svjesna sam posebne važnosti ovih infrastrukturnih rješenja. Moja iskustva i svakodnevni život uz obalu omogućili su mi da iz prve ruke vidim kako neadekvatna vodoopskrba i odvodnja mogu negativno utjecati na kvalitetu života i okoliš. Inspirirana ovim iskustvima, odlučila sam istražiti različite aspekte hidrotehničkih tunela, od inženjerskih metoda i materijala korištenih u njihovoj izgradnji, do analiza njihovog utjecaja na okoliš i lokalnu zajednicu. Često sam bila svjedok problema s neadekvatnom odvodnjom otpadnih voda što je rezultiralo onečišćenjem mora. Ovi problemi nisu samo tehničke prirode, već imaju i značajan utjecaj na kvalitetu života lokalnog stanovništva i očuvanje prirodnih resursa obalnih područja. Stoga, moja motivacija za istraživanje ove teme leži u želji da doprinesem rješavanju ovih izazova kroz inovativna

inženjerska rješenja, osiguravajući održiv razvoj i očuvanje prirodnih ljepota obale za buduće generacije.

2. OPĆENITO O HIDROTEHNIČKIM TUNELIMA

2.1. Općenito

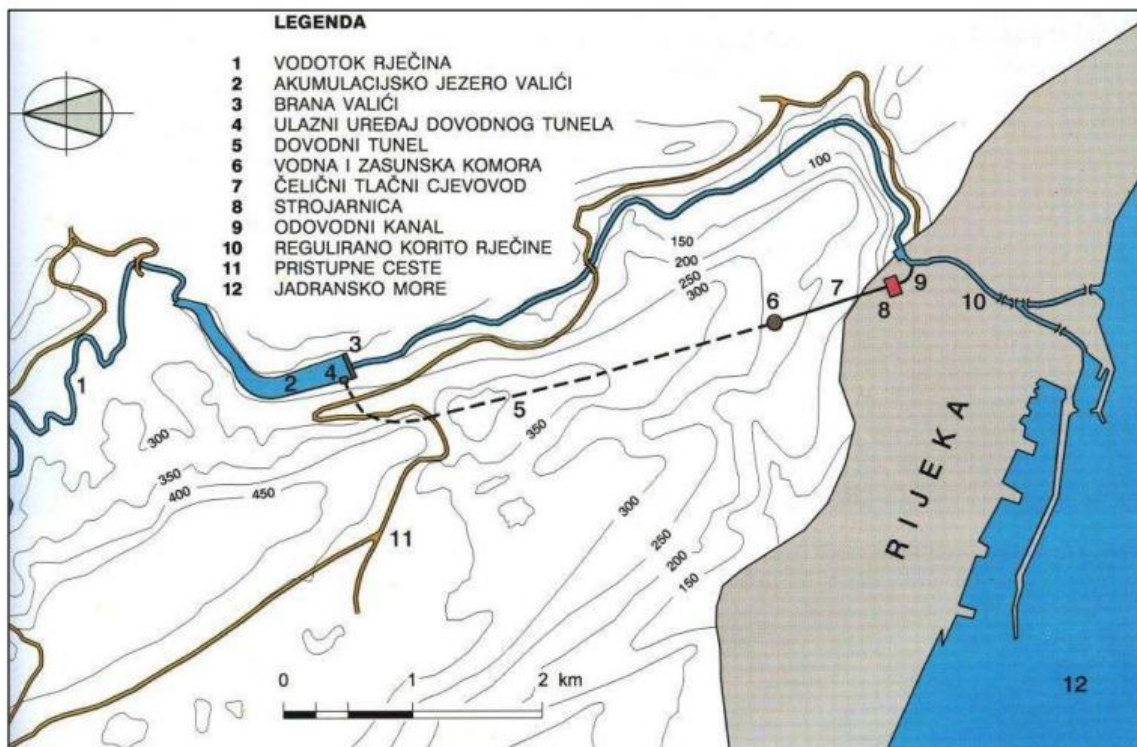
Hidrotehnički tuneli su hidrotehničke građevine koje nam služe da bi zadovoljili potrebe ljudi u odnosu na vodu i to posebno potrebu korištenja voda i zaštite od voda. Koristimo ih još od davnina pretežno za preusmjeravanje toka rijeke, opskrbu nekog područje vodom i natapanje. Danas imaju mnogobrojne uloge i neizostavni su dio čovjekova života.

Hidrotehničke tunele definira: namjena, trasa, poprečni profil, uzdužni pad i niveleta, obloga.

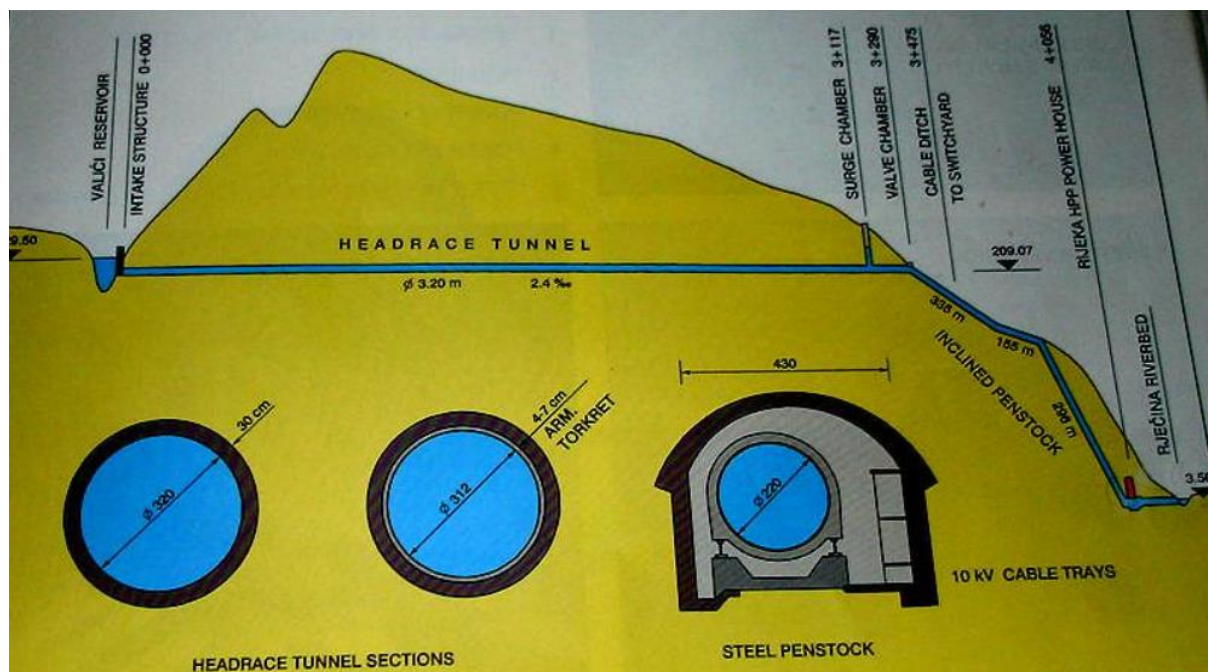
2.1.1. Namjena

Prema namjeni, hidrotehnički tuneli se dijele na:

- tunele za vodoopskrbu
- tunele za navodnjavanje
- tunele za odvodnju i drenažu
- tunele za kanalizaciju
- dovodne, odvodne i reverzibilne tunele hidroelektrana
- obilazne tunele
- plovne tunele



Slika 3: Shema reverzibilne HE Rijeka (Izvor: [11], Slika 3.)



Slika 4: Poprečni profil dovodnog tunela hidroelektrane Rijeka (Izvor: [14])

2.1.2. Trasa

Pri trasiranju hidrotehničkog tunela težimo najisplativijem rješenju, a to je pravac. Spajanjem dviju točaka pravcem ostvarujemo najmanje hidrauličke gubitke, ali pri trasiranju moramo voditi računa i o mehaničkim karakteristikama stijena kroz koje će tunel proći. Za određivanje optimalne trase potrebno je provesti istražne radove kojima utvrđujemo funkcionalnost, izvedivost i troškove. Radovi se izvode s pomoću istražnih bušotina i jama iz kojih se vade uzorci tla koji služe za laboratorijska ispitivanja, ali u njima se vrše i terenska ispitivanja. Što je zahvat složeniji potrebno je više istraživanja.

Istražni radovi koji se provode su:

- 1) geološki - Geološke podloge definiraju uslojenost tla i tektonskih strukturnih oblika te odnos tla i vode. Potrebne su kod velikih i složenih radova, ali su jako skupi. Zbog toga se izvode samo na ključnim mjestima, a za okolna područja se primjenjuju znanja i spoznaje stručnjaka.
- 2) inženjersko – geološki - Inženjerskoj geologiji obrađuje spoznaje o stijenskoj građi, dinamici i postanku Zemlje.
- 3) hidrogeološki - Hidrogeološke podloge su tražene kod građevina za zahvat i spremanje vode jer omogućuju velik uvid u interakciju vode i tla.
- 4) geotehnički - Geotehničke podloge se sastoje od: geoloških, geomehaničkih i seizmičkih podloga. Za njih nam je potrebno poznavanje karakteristika tla na mjestu izvedbe tunela i oko njega. Dubina na kojoj se određuju mehanička svojstva stijene ovisi o utjecaju prostora na građevinu i obrnuto. Definira se rasprostranjenost, uslojenost i mehaničke osobine tla i stijene. Istražni radovi za stijene su potrebne samo kod većih građevinskih radova, dok se svojstva tla uvelike razlikuju ovisno o tome da li se radi o koherentnom ili nekoherentnom tlu.

2.1.3. Poprečni profil

Poprečni profil hidrotehničkog tunela bit će opisan dalje u radu ovisno o načinu tečenja tunela.



Slika 5.: Hidrotehnički tunel koji je prokopan ispod brda Srđ te izlazi u blizini zgrade Vodovoda Dubrovnik radi daljnje vodoopskrbe cijelog Grada (Izvor: [3])

2.1.4. Uzdužni pad i niveleta

Na uzdužni pad i niveletu utječu uvjetovane karakteristične kote. Kod tlačnih tunela su to kote na trasi koje su fiksne i bitne u smislu sprječavanja ulaza zraka u tunel. Uzdužni pad prati smjer tečenja, a minimalno iznosi 2 i 4 ‰. Kod tunela sa slobodnim vodnim licem uzdužni pad ovisi o maksimalnom protoku. Brzina kojom protok protječe kroz tunel u direktnoj je vezi s uzdužnim padom tunela, što je pad veći, brzina protoka je veća. Velike brzine mogu uzrokovati oštećenja i urušavanje tunela, dok male uzrokuju nakupljanje nanosa i začepljenja.

2.1.5. Obloga

Obloga tunela je cjelina koju čine obložna konstrukcija, stijenska masa i sve potrebne mjere poduzete da bi cjelina bila stabilna i vodonepropusna. Tuneli se projektiraju kao obloženi i neobloženi. Ako se radi o tunelu koji je izveden u kvalitetnoj stijenskoj masi najčešće ga nećemo oblagati.

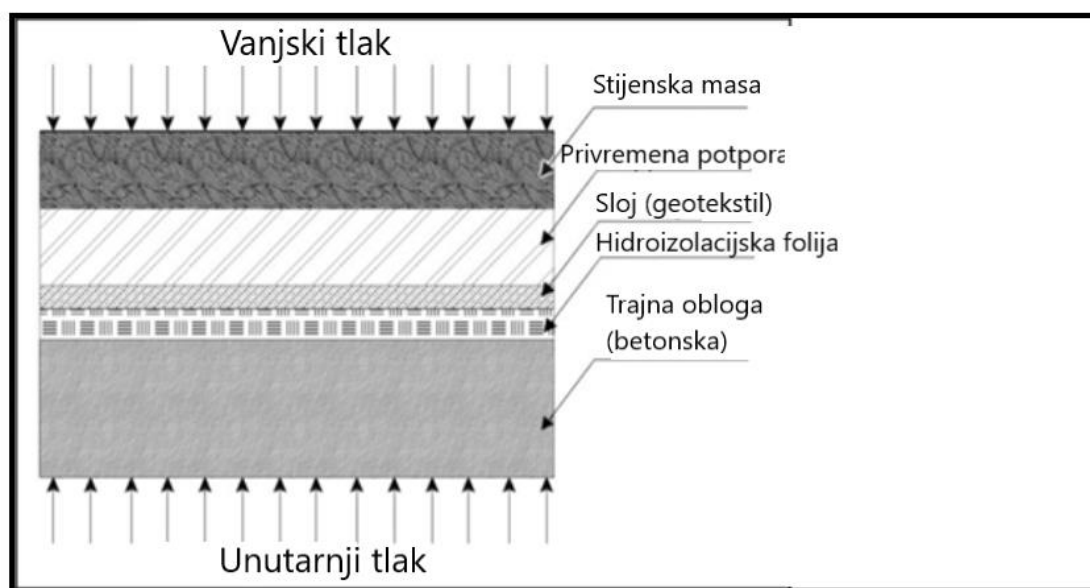
Tuneli se oblažu kako bi:

- spriječili gubitak vode uslijed procjeđivanja
- smanjili hrapavost odnosno hidrauličke gubitke
- povećali dopuštene brzine

- smanjili troškove održavanja
- zaštitili okoliš od voda koje se procjeđuju u podzemlje

Neka od opterećenja koja djeluju na tunelsku oblogu:

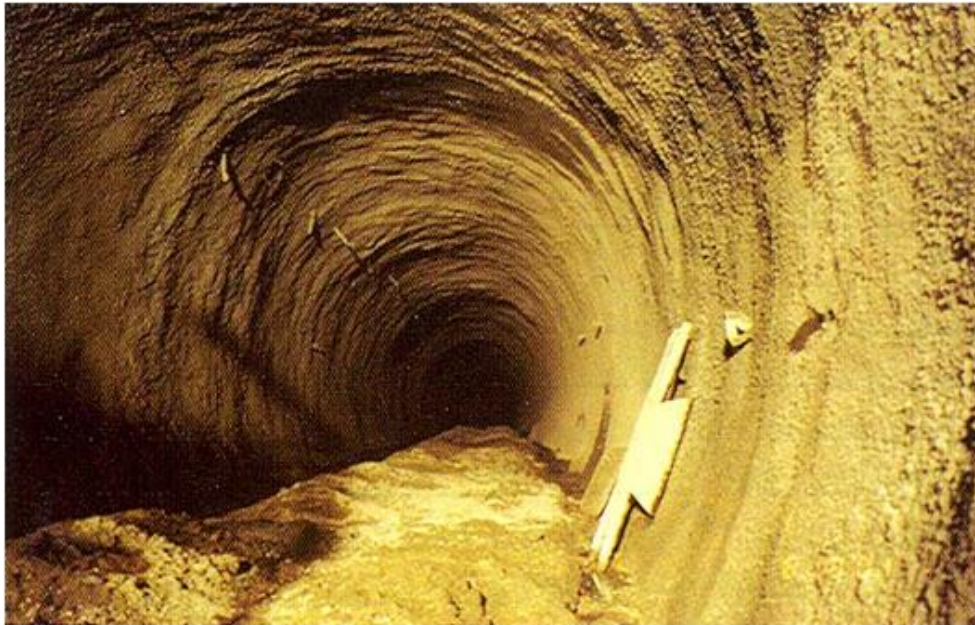
- tlak stijene
- vlastita težina obloge
- unutrašnji tlak vode
- vanjski tlak vode
- prenaprezanje stijene
- bubrenje i puzanje...



Slika 6.: Primjer vodonepropusne obloge hidrotehničkog tlačnog tunela (Izvor: [5])

Kod hidrotehničkih tunela najčešće koristimo:

- betonske obloge
- armiranobetonske obloge
- kompozitne obloge



Slika 7.: Izgled završne obloge od mlaznog betona napravljenog na hidrotehničkom tunelu Stupe (Izvor: [6])

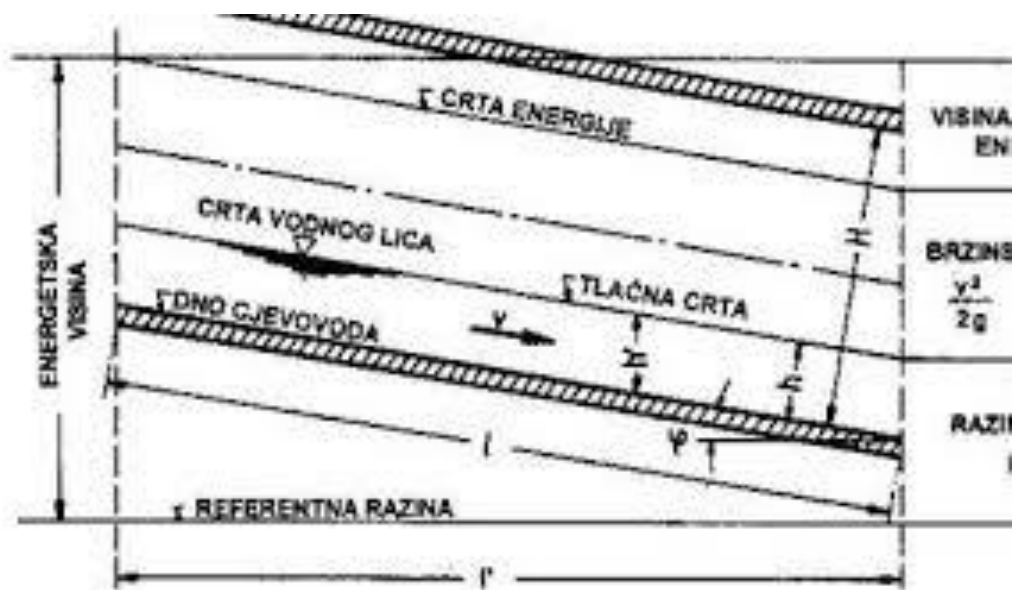
3. TUNELI PREMA UVJETIMA TEČENJA

Razlikujemo tunele sa slobodnim vodnim licem, tlačne tunele i tunele s promjenjivim režimom tečenja.

3.1. Tuneli sa slobodnim vodnim licem

Kod ovih tunela voda ne teče punim poprečnim presjekom. Provodi se uz pretpostavku jednolikog, stacionarnog tečenja (konstantna dubina vode, isti uzdužni pad dna tunela, vodnog lica i linije energije). Primjenjuju se kod malih oscilacija razine vode u zoni ulaza ili recipijenta. Na izbor profila utječu:

- hidraulički uvjeti
- uvjeti brdskog pritiska
- uvjeti izvedbe
- uvjeti pogona, kontrole i održavanja.



Slika 8.: Grafički prikaz jednolikoga tečenja (Izvor: [7])

Hidraulički uvjeti reprezentiraju zahtjeve da uz iste uvjete protjecanja imamo najmanju smočenu površinu. Kako bi to ostvarili potrebno je zaobliti sve kutove, lomove. Hidrotehnički uvjeti ovise i o tome da li nam je tunel obložen i ako je, kakvu oblogu imamo.

Udaljenost između vodnog lica i tjemena tunela ne smije biti manja od $0,13 H$ tj. 40 cm. Pri maksimalnom protoku slobodna visina ne smije biti manja od $0,2 H$, odnosno profil se puni do $0,8 H$.

Kod ovih tunela pad dna tunela je hidraulički pad tunela.

Uvjeti brdskog pritiska ovisno o intenzitetu i smjeru djelovanja brdskih pritisaka biramo oblik poprečnog profila tunela.

Uvjeti izvedbe podrazumijevaju izbor optimalnih rješenja u vezi profila, mehanizacije, materijala, transporta, brzine građenja... Profil mora biti takav da je njegova izvedba najracionalnija, materijal da ga imamo u dovoljnim količinama, a transport brz i efikasan. Mehanizacija nam ponekad stvara probleme zbog svojih propisanih najmanjih dimenzija i raspoloživosti na tržištu.

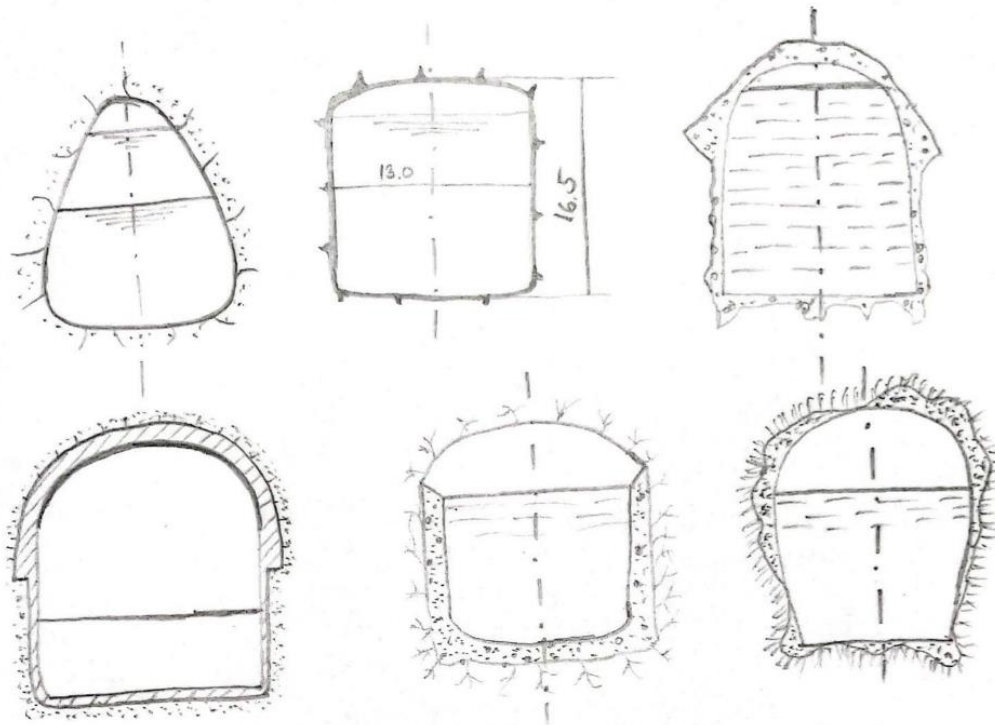
Različiti uvjeti kojima je tunel izložen tijekom svoje eksploatacije traže različite prilagodbe u smislu kontrole i održavanja. Ovi uvjeti predstavljaju i sve potrebne mjere za sigurni provođenje pregleda i popravaka bez ugrožavanja radnog osoblja i stručnjaka.

Obloge tunela sa slobodnim vodnim licem izvode se najčešće kao betonske. Armiranobetonska obloga se isto upotrebljava ali u slučajevima velikog brdskog pritiska s djelomičnom ili potpunom armaturom. Njena uloga je preuzeti brdski pritisak, pritisak vode, osigurati tunel od gubitka vode, smanjiti gubitak od tečenja vode, sprječavanje gubitka stabilnosti okolne stijene, izravnavanje unutrašnje površine stijene... Oštećenje obloge nastaje u slučajevima prodora vode i nanosa koji mehanički oštećuju oblogu ili smanjuju prionjivost stijene i obloge, što može prouzročiti i urušavanje tunela. Bitan nam je odnos stijene i obloge, ali i svojstva same stijene koja preuzima unutrašnji tlak vode uslijed djelovanja tlaka na oblogu a zatim obloge na stijenu. Ovisno o silama koje djeluju na oblogu vrši se proračun i određuje hoće li i kako će biti armirana (jednostruko, dvostruko). Statički proračun se može odrediti korištenjem različitih metoda, a najkorištenije u novije vrijeme su metoda konačnih elemenata i metoda sila.

3.1.1. Karakteristični poprečni profili

Razlikujemo:

- pravokutni oblik s plitkim svodom (slaba vertikalna komponenta tlaka, ne postoji bočni horizontalni tlak)
- koritasti oblik s naglašenim svodom (umjereni vertikalni tlakovi, neznatni horizontalni)
- jajoliki tip (veliki vertikalni tlakovi, mali bočni)
- potkovičasti svod (veliki vertikalni i horizontalni tlakovi)
- kružni tip (svestrani pritisci).



Slika 9: Karakteristični profili tunela sa slobodnim vodnim licem (Izvor: [1], slika 4.2.38)

Tuneli sa slobodnim vodnim licem ne trebaju biti cijeli obloženi. Razlog tomu je njihova izvedba u čvrstim i vodonepropusnim stijenama. Tuneli se oblažu i sidre kako bi se osigurali od ispadanja materijala, nadsloja, prometnog opterećenja, radi povećanja vodonepropusnosti te za izravnavanje profila i ispune prekopa.

3.1.2. Hidraulički proračun

Hidraulički proračun hidrotehničkih gravitacijskih tunela prvenstveno ovisi o hidrauličkim karakteristikama poprečnih profila odnosno o: $f_\omega \left(\frac{h_0}{H} \right)$, $f_R \left(\frac{h_0}{H} \right)$, $f_c \left(\frac{h_0}{H} \right)$.

Tečenje sa slobodnim vodnim licem opisuje se Chezyjevom jednačbom. Chezyev koeficijent C je funkcija hidrauličkog radijusa, pada linije energije i materijala iz kojeg je cijev izgrađena. Chezyeva jednačba ima oblik:

$$v = C\sqrt{R \cdot I}$$

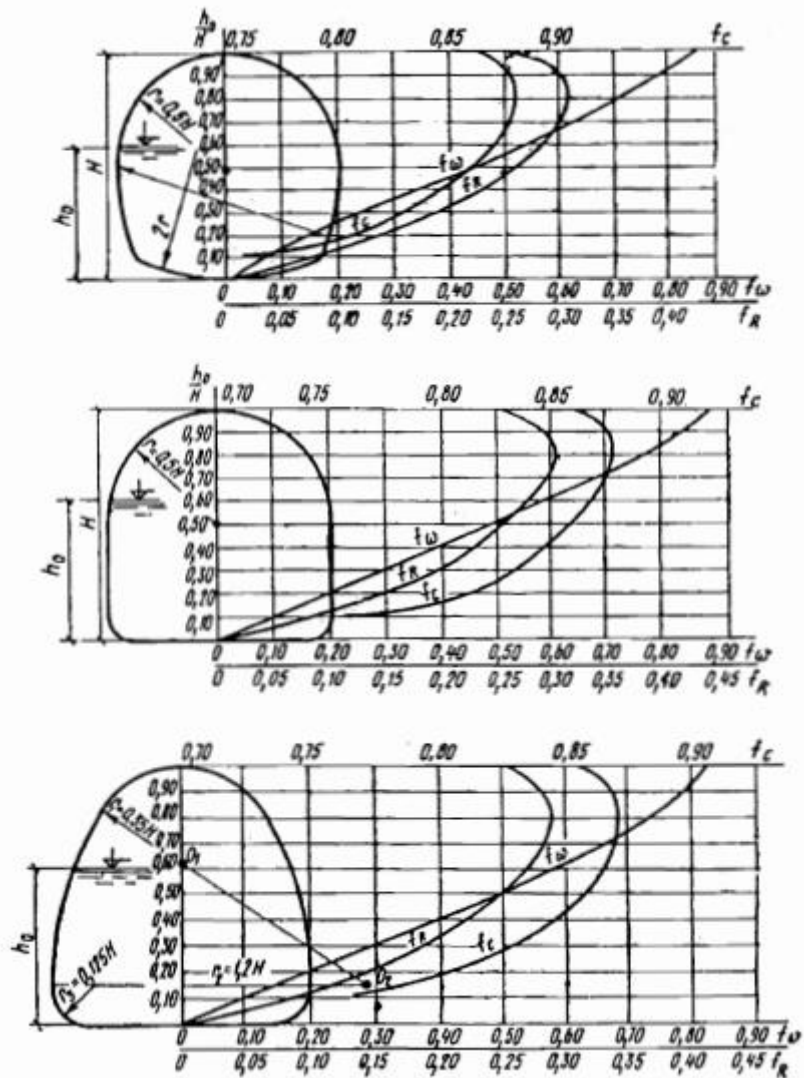
Pri čemu:

v – srednja vrijednost brzine

C – Chezyev koeficijent

R – hidraulički radijus

l – pad linije energije



Slika 10: Hidrauličke karakteristike koritastog, jajolikog i potkovičastog profila (Izvor: [1], slika 4.2.34)

$$\omega = H^2 \cdot f_{\omega} \left(\frac{h_0}{H} \right)$$

$$R = H \cdot f_R \left(\frac{h_0}{H} \right)$$

$$C = \frac{1}{n} \cdot H^{0,11} \cdot f_c \left(\frac{h_0}{H} \right)$$

Gdje je:

ω – omočena površina

C – Chezyev koeficijent

R – hidraulički radijus

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^y = \frac{1}{n} \cdot R^{0,11}$$

Protok se određuje iz jednadžbe kontinuiteta:

$$Q = v \cdot A$$

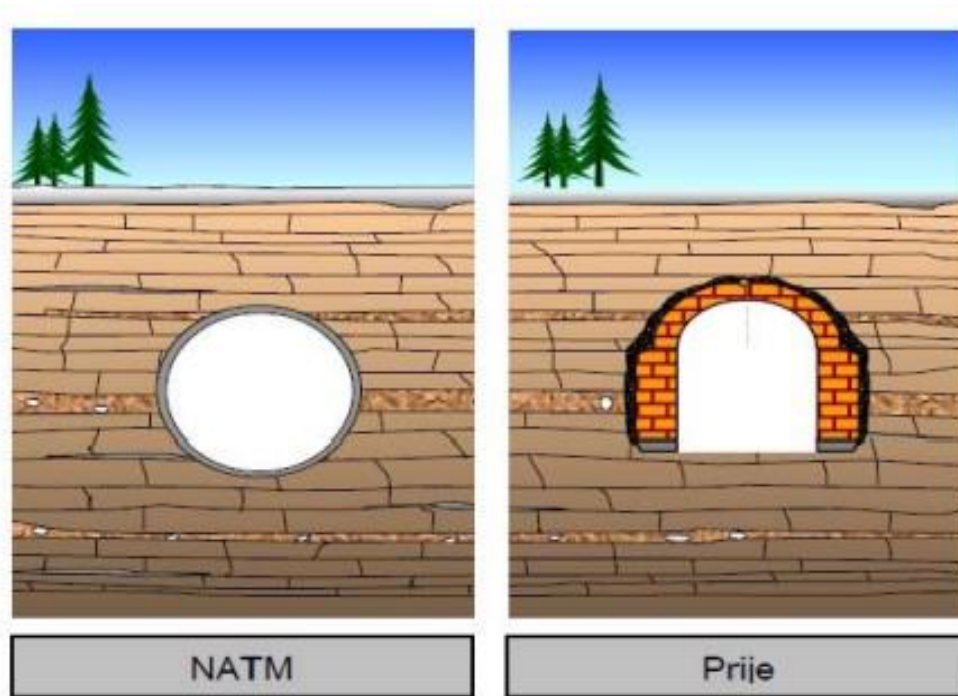
Osnovna jednadžba za proračun jednolikog tečenja je Chezyjeva formula za brzinu, koja uz supstituciju Manningovog koeficijenta hrapavosti poprima oblik:

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

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}}$$

3.2. Tuneli pod tlakom

Tlačni tuneli gotovo se isključivo koriste u hidroenergetskim derivacijskim postrojenjima, izloženim složenim hidrauličkim i hidrodinamičkim uvjetima. Derivacijski tlačni tuneli služe za dovod vode iz akumulacija do komora unutar tunela, uzimajući u obzir topografske, geološke i ekonomske čimbenike. Položaj ulaznih građevina tunela i osi tunela ovisi o promjenama razine vode u akumulacijskom bazenu, izazvanim hidrološkim režimom rijeke i radom hidroelektrane. Specijalne hidrotehničke građevine, smještene na kraju derivacijskog tlačnog tunela, kontroliraju oscilacije vode i promjene pritiska uzrokovane radom agregata hidroelektrane. Dugi gravitacijski derivacijski tuneli nisu pogodni za promjenjivo opterećenje, dok su tlačni tuneli idealni za teške pogonske uvjete, naročito kod padova vode većih od 50 m koji vidimo na primjeru hidroelektrana. Danas se kod izgradnje uglavnom koristi novi austrijski postupak koji karakterizira izvođenje bez privremene podgrade, a kasnije se tunel osigurava sidrima, prskanim betonom... NATM je osnovana na konceptu da stijena ili tlo koji okružuju podzemni otvor postaju dio nosive konstrukcije kroz aktivaciju nosivog prstena. NATM je bazirana na in-situ mjerenjima tijekom građenja tunela. Na taj način se osigurava u tlu optimalan način primjene primarne tunelske podgrade prije same ugradnje sekundarne odnosno konačne betonske obloge.



Slika 11: Stijenska masa kao glavni nosivi element (Izvor: [10], Slika 3.1)

Prednosti tlačnih tunela:

- moguće znatne oscilacije vode na ulazu odnosno u akumulaciji
- manji profili
- dozvoljeni vertikalni lomovi trase

Hidraulički proračun tlačnog tunela izvodi se kao kod cijevi pod tlakom. Najniži piezometarski nivo tijekom ravnomjernog protoka ključan je za određivanje nadmorske visine tunela. Poznavanjem pada ovog nivoa može se hidraulički odrediti i uzdužni nagib tunela. Kod derivacijskih tlačnih tunela važno je osigurati da najniža piezometarska linija bude iznad vrha svoda u svakom presjeku; u najkritičnijim točkama, poput vodne komore, ta linija mora biti iznad za 1 do 1,5 promjera tunela.

Kod tlačnih tunela često se koristi i Mannin – Sticklerov koeficijent glatkosti $K = 1/n$, gdje je n koeficijent hrapavosti. Teško ga je predvidjeti zbog različitih utjecaja i promjena tijekom eksploatacije. Za računanje protoka preporučuje se korištenje Manningove jednadžbe i Manningovog koeficijenta hrapavosti jer se pokazalo da Chezyjev koeficijent hrapavosti nije konstantan za jedno korito već da ovisi o hidrauličkom radijusu.

Tablica 1.: Vrijednosti koeficijenta glatkosti K (Izvor: [1], tablica 4.2.5)

Kvaliteta obrade tunelske obloge	K
Tunel bez obloge – vrlo gruba neobrađena površina stijene	28-35
Betonska obloga od mlaznog betona koja pokriva neobrađenu površinu stijene	40-50
Betonska i armiranobetonska obloga s grubom površinom	70-75
Betonska i armiranobetonska obloga s glatkom površinom	75-80
Betonska i armiranobetonska obloga s vrlo glatkom površinom	85-95

Obloge koje se koriste za tlačne tunele su:

- betonske
- kompozitne

Betonske obloge mogu biti:

- 1) nearmirane jednoslojne - Nearmirana jednoslojna obloga jedna je od najkorištenijih, a izvodi se kod tunela u kvalitetnoj stijeni, a koji su izloženi malim tlakovima. Debljina obloge iznosi od 25 – 50 cm.
- 2) armirane jednoslojne - Armirane jednoslojne obloge koriste se za malo veće tlakove od nearmiranih jednoslojnih. Mogu biti jednostruko ili dvostruko armirane čime povećavamo vlačna svojstva obloge te otpornost pri temperaturnim promjenama.
- 3) armirane i nearmirane dvoslojne - Dvoslojne obloge su jedne od skupljih obloga, pa se koriste samo kad je to neizbježno. Sastoje se od dva dijela, prvi je za preuzimanje vanjskih, a druga za preuzimanje unutarnjih tlakova i opterećenja. Izvode se kao jednostruko ili dvostruko armirani.
- 4) prednapregnute - Prednapregnute obloge povećavaju vodonepropusnost i smanjuju pojave pukotina. Temelje se na principu tlačnog prednaprezanja, a prednaprezanje može biti mehaničko i injektiranjem.

Kompozitne obloge izvodimo sprežanjem dvaju materijala, a to su beton i čelik kako bi osigurali tunel u najtežim uvjetima i pri velikim unutarnjim tlakovima.

Razni čimbenici utječu na oblogu tlačnog tunela, kao što su: brdski pritisak, unutarnji hidrostatički pritisak vode, temperaturne razlike vode i stijene, skupljanje i bubrenje betona, težina obloge, težina vode u tunelu, seizmičke sile, pritisci injektiranja, vanjski pritisci podzemne vode, pritisci prednaprezanja tunelske obloge, vanjsko pokretno opterećenje kod malog nadsloja.

Dok neki brdski pritisci imaju samo teoretski značaj, ostali djeluju pozitivno na tunelsku oblogu u odnosu na unutarnji hidrostatički tlak vode. Podgradni sustav koji preuzima te brdske pritiske

tretira se kao primarna obloga tunela, ali u obzir se treba uzeti stanje i raspucanost stijenske mase.



Slika 12: Shema metode poboljšanja stijenskih masa (Izvor: [13], Slika 8.)

Prema hidrostatičkom pristupu tunele dijelimo na niskotlačne i visokotlačne hidrotehničke tunele. Kao što smo prije spomenuli, hidrostatički pritisak definira položaj piezometarske linije na ulazu u tunel i u vodnoj komori. Iako je hidraulički i statički gledano kružni profil najbolji izbor, u zadnje vrijeme se više koristi potkovičasti profil.

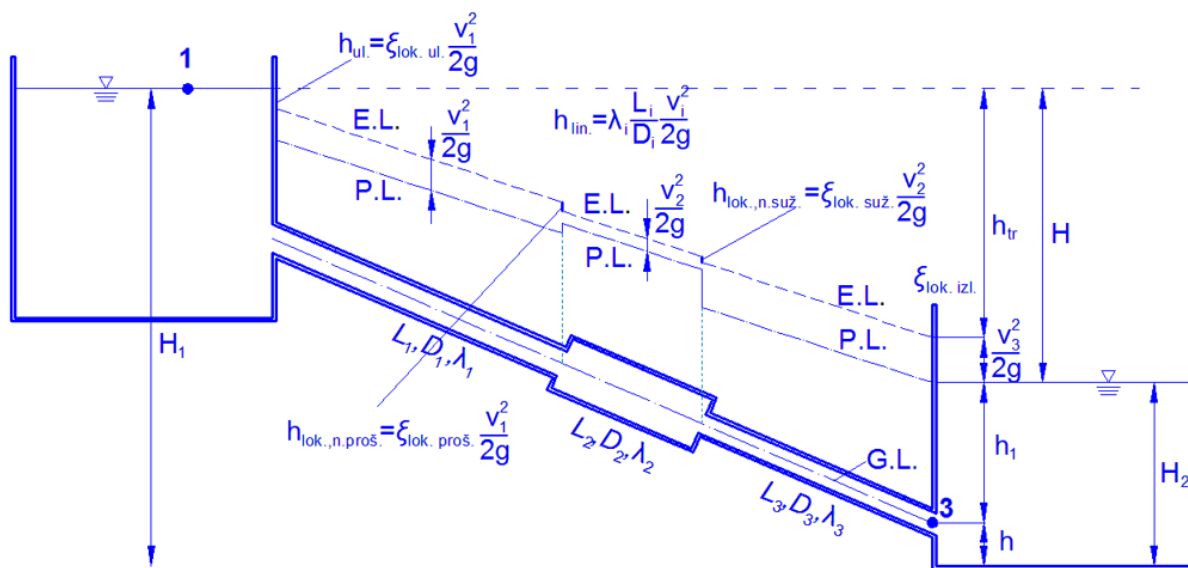
Temperatura stijene je u principu uvijek ista, međutim najopasniji period je zimski kada je temperatura vode znatno manja od uobičajene. Uslijed toga, obloga, pa čak i stijenska masa, se hladi i skuplja što izaziva dodatna naprezanja i odvajanje obloge od stijene.

Skupljanje i bubrenje betona su pojave vezane za sastav samog betona i uvjetima okoline odnosno temperaturi te količini vlage i vode u okolini. Skupljanje betona nam nije toliko bitno jer većinom ne uzrokuje bitna naprezanja. Posebno se promatra bujanje betonske obloge kako bi se spriječila nestabilnost samog tunela.

3.2.1. Karakteristični poprečni profili

Hidraulički najpovoljniji oblik tunela pod tlakom je kružni. Radijus kružnog tunela se određuje prema tehno-ekonomskoj analizi

3.2.2. Hidraulički proračun



Slika 13: Strujanje pod tlakom u kružnim cijevima (Izvor: [15])

$$v = C\sqrt{R \cdot I}$$

$$Q_i = A \cdot v = C\sqrt{R \cdot I}$$

Za kružni presjek:

$$R = \frac{r}{2}$$

Prema Forchheimeru:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{0,2}$$

$$Q_i = \frac{1}{n} \cdot 3,14r^2 \cdot R^{0,2} \sqrt{R \cdot I} = \frac{1}{n} \cdot 3,14r^2 \cdot R^{0,7} \cdot I^{0,5} = 1,93 \frac{1}{n} \cdot r^{2,7} \cdot I^{0,5}$$

$$I = 0,268 \frac{n^2 \cdot Q_i^2}{r^{5,4}}$$

$$I = \frac{h}{L}$$

$$Q = \varphi \cdot A \sqrt{2g \cdot \Delta h}$$

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi_{lok} + \sum \xi_{lin}}}$$

Gdje je:

Q_i – instalirani protjecaj

r – radijus tunela

L – dužina tunela

h – gubitak na padu zbog trenja

n – koeficijent trenja

φ – koeficijent gubitaka

Koeficijent trenja se računa prema izrazu: $K = \frac{1}{n}$, a vrijednosti koeficijenta K su prikazane u tablici (Tablica 1).

Tablica 2: Postupak određivanja hidrauličkih gubitaka (Izvor: [1])

Objekt	Gubitak pada	Vrijednost koeficijenta - ζ	Vrijednosti u proračunu																
Ulaz u tunel a) hidraulički neoblikovan b) hidraulički oblikovan	$h_u = \zeta \cdot \frac{v_u^2}{2g}$	$\zeta = 0,5$ $\zeta = 0,04 - 0,10$	v_u – brzina vode na ulazu u tunel																
Fina rešetka	$h_r = \zeta \cdot \frac{v_r^2}{2g}$	$\zeta = \beta \cdot \left(\frac{s}{b}\right)^{\frac{4}{3}}$	v_r – brzina vode na rešetki β – koeficijent koji ovisi od oblika šipki $\beta = 2,42$ za pravokutne $\beta = 1,79$ za okrugle s – debljina šipki b – čisti razmak šipki																
Oštra krivina	$h_{kr} = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g}$	$\zeta = 0,9457 \left[\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]^2$ $+ 2,047 \left[\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]^4$	θ – kut krivine v – brzina vode u tunelu																
Blaga krivina	$h_{kr} = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g}$	$\zeta = \frac{\theta/2}{90^\circ} \cdot \left[0,131 + 0,163 \left(\frac{D}{R}\right)^{3,3} \right]$	R – polumjer krivine D – dijametar tunela																
Naglo proširenje	$h_{pr} = \zeta \cdot \frac{v_1^2}{2g}$	$\zeta = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2$	ω_1 – površina tunela prije proširenja ω_2 – površina tunela nakon proširenja v_1 – brzina vode do proširenja																
Naglo suženje	$h_{su} = \zeta_c \cdot \frac{v_2^2}{2g}$	<table border="1"> <tr> <td>$\frac{\omega_1}{\omega_2}$</td> <td>0,01</td> <td>0,02</td> <td>0,40</td> </tr> <tr> <td>ζ_p</td> <td>0,50</td> <td>0,63</td> <td>0,34</td> </tr> <tr> <td>$\frac{\omega_1}{\omega_2}$</td> <td>0,60</td> <td>0,80</td> <td>1,0</td> </tr> <tr> <td>ζ_c</td> <td>0,25</td> <td>0,10</td> <td>0</td> </tr> </table>	$\frac{\omega_1}{\omega_2}$	0,01	0,02	0,40	ζ_p	0,50	0,63	0,34	$\frac{\omega_1}{\omega_2}$	0,60	0,80	1,0	ζ_c	0,25	0,10	0	ω_1 – površina tunela prije suženja ω_2 – površina tunela nakon suženja v_2 – brzina vode nakon suženja
$\frac{\omega_1}{\omega_2}$	0,01	0,02	0,40																
ζ_p	0,50	0,63	0,34																
$\frac{\omega_1}{\omega_2}$	0,60	0,80	1,0																
ζ_c	0,25	0,10	0																

Gubitak na padu:

$$\Delta h = \frac{L \cdot v^2}{C^2 \cdot R}$$

3.3. Tuneli s promjenjivim režimom tečenja

Tuneli s promjenjivim režimo tečenja u praksi se nalaze u sustavima odvodnje kod kojih u redovnim uvjetima imamo tečenje sa slobodnim vodnim licem, a u izvanrednim u pravilu kratkotrajnim situacijama tečenje pod (relativno malim) tlakom.

Hidraulički proračun ovih tunela provodi se uz pretpostavku tečenja u turbulentno prijelaznom režimu upotrebom Darcy-Weisbachove i Colebrook-Whiteove jednadžbe:

$$I = \frac{\lambda \cdot v^2}{D \cdot 2g}$$

Gdje su:

λ – koeficijent trenja

L – duljina dionice (m)

v – srednja brzina strujanja (m/s)

D – unutarnji promjer cjevovoda (m)

g – ubrzanje uslijed sile teže (m/s²)

I – pad energetske linije

Izraz za koeficijent trenja mijenja se ovisno o režimu otjecanja. Kod dimenzioniranja mreže odvodnje proračun se provodi u skladu s Colebrook-Whiteovom formulom općeg oblika:

$$\frac{1}{\lambda} = -2 \log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3,71} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right)$$

Gdje je:

ε – apsolutna hidraulička hrapavost (mm)

Re – Reynoldsov broj

Iz gornje dvije jednađbe dobije se izraz za brzinu tečenja:

$$v = -2\sqrt{2g \cdot D \cdot I} \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{D} + \frac{2,51v}{D\sqrt{2g \cdot D \cdot I}} \right)$$

Pa je prema tome za cijevi okruglog presjeka protok jednak:

$$Q = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \left[-2\sqrt{2g \cdot D \cdot I} \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{D} + \frac{2,51v}{D\sqrt{2g \cdot D \cdot I}} \right) \right]$$

Gornje jednađbe koriste se za proračun cijevi ispunjenih do vrha dok se za djelomično ispunjene cijevi koriste funkcije:

$$\frac{v_d}{v_p} = f \left(\frac{h_d}{h_p} \right), \quad \frac{Q_d}{Q_p} = f \left(\frac{h_d}{h_p} \right)$$

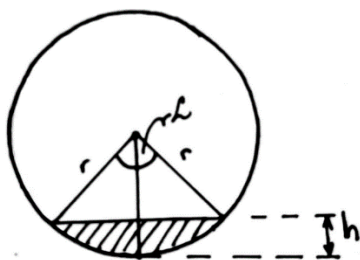
4. PRIMJER PRORAČUNA

Potrebno je odrediti promjer obilaznog tunela kružnog presjeka namijenjenog za zaštitu gradilišta od velikih voda. Zadano je: duljina tunela 350m, s padom 1,44% i pretpostavljenim Manningovim koeficijentom $n = 0,013$ ako je projektni protok $Q^{20\text{god}} = 100\text{m}^3/\text{s}$. Također potrebno je odrediti visinu uzvodnog zagata kojim će biti osigurani odgovarajući uvjeti tečenja.

4.1. Proračun za uvjete tečenja sa slobodnim vodnim licem

Ako je gornji dio tunela nepotopljen ili potopljen uz uvjet $H/d < 1.2$, a donji dio nepotopljen tečenje se odvija sa slobodnim vodnim licem. Prema tome koristimo formulu:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}}$$



Ako je:

$$A = r^2 \pi \cdot \frac{2 \cdot \cos^{-1} \frac{r-h}{r}}{360} - \sqrt{r^2 - (r-h)^2} \cdot (r-h)$$

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

$$O = l + 2a$$

$$l = r^2 \pi \cdot \frac{2 \cdot \cos^{-1} \frac{r-h}{r}}{360} \cdot \frac{2}{r}$$

$$a = \sqrt{r^2 - (r-h)^2}$$

$$O = r^2 \pi \cdot \frac{2 \cdot \cos^{-1} \frac{r-h}{r}}{360} \cdot \frac{2}{r} + 2 \cdot \sqrt{r^2 - (r-h)^2}$$

Gdje su:

- r- polumjer cijevi (tunela),
- h- visina vode od dna tunela do slobodnog lica

Pretpostavimo da je $D = 3\text{m}$, odnosno $r=1,5\text{m}$.

Ako pretpostavimo da je $Q= 5 \text{ m}^3/\text{s}$, iterativnim postupkom određujemo pripadne dubine:

Za $h=0,5 \text{ m}$;

$$A = 1,5^2\pi \cdot \frac{2 \cdot \cos^{-1} \frac{1,5 - 0,5}{1,5}}{360} - \sqrt{1,5^2 - (1,5 - 0,5)^2} \cdot (1,5 - 0,5) = 0,77 \text{ m}^2$$

$$l = 1,5^2\pi \cdot \frac{2 \cdot \cos^{-1} \frac{1,5 - 0,5}{1,5}}{360} \cdot \frac{2}{1,5} = 2,52 \text{ m}$$

$$a = \sqrt{1,5^2 - (1,5 - 0,5)^2} = 1,12 \text{ m}$$

$$O = 2,52 + 2 \cdot 1,12 = 4,76 \text{ m}$$

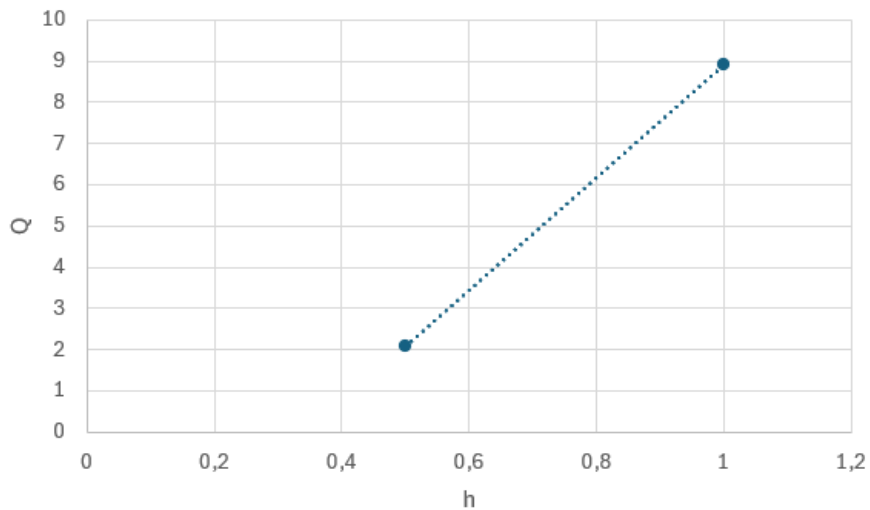
$$R = \frac{0,77}{4,76} = 0,16 \text{ m}$$

$$Q = \frac{1}{0,013} \cdot 0,77 \cdot 0,16^{\frac{2}{3}} \cdot 0,0144^{\frac{1}{2}} = 2,09 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tablica 3: Q-h

h/[m]	A/[m ²]	O/[m]	R/[m]	Q/[m ³ s ⁻¹]
0,5	0,77	4,76	0,16	2,09
1	2,06	6,52	0,32	8,9

Kada je $h=1 \text{ m}$, slijedi $Q=8,9 \text{ m}^3/\text{s} > 5 \text{ m}^3/\text{s}$.



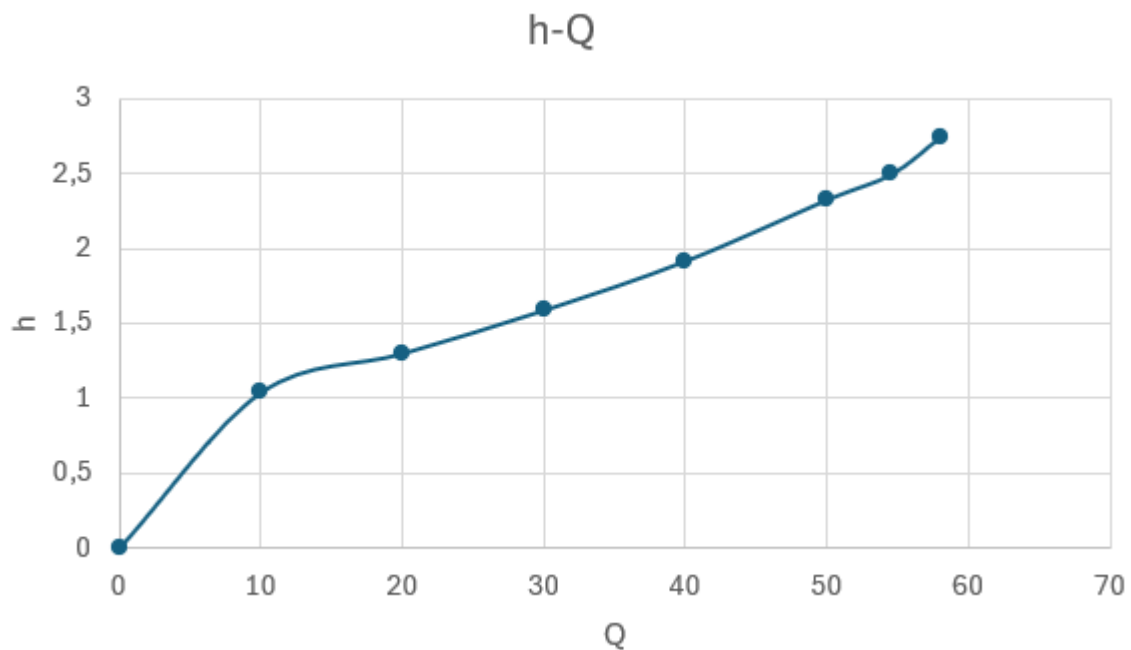
Slika 14: Q-h

Interpolacijom prema slici 14. očitavamo vrijednost h za $Q=5 \text{ m}^3/\text{s}$, pa je $h=0,7\text{m}$.

Primjenom istog postupka za pretpostavljeni $Q=10 \text{ m}^3/\text{s}$, $20 \text{ m}^3/\text{s}$...,slijede dubine prikazane u tablici 4. i na grafu.

Tablica 4 Q-h

$Q/[\text{m}^3\text{s}^{-1}]$	$h/[\text{m}]$
10	1,04
20	1,3
30	1,59
40	1,92
50	2,33
54,52	2,5
57,99	2,75



Slika 15: h-Q

Ako je gornji dio tunela potopljen pod uvjetom $1,2 \leq h/d \leq 1,5$, a donji nepotopljen ulazimo u tečenje u nestalnom prijelaznom režimu koje je na grafu označeno iscrtkano a raspon je od $h=3\text{m}$ do 4m .

4.2. Proračun za uvjete tečenja pod tlakom

Ako je gornji dio tunela potopljen, a donji nepotopljen uz uvjet da je $h/d > 1,5$ i uz uvjet da je tunel dug, radi se o tečenju pod tlakom.

$$Q = \varphi \cdot A \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h}$$

$$\text{Znamo da je } \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi_{lok} + \sum \xi_{lin}}}$$

Iz tablice lokalnih gubitaka smo pretpostavili $\xi_{lok}=0,5$, a $\xi_{lin}=0,014$

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,5 + 0,014}} = 0,81$$

Za $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$ računamo:

$$100 = 0,81 \cdot \frac{3^2 \cdot \pi}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot \Delta h}$$

Slijedi:

$$\Delta h = 15,52 \text{ m}$$

Dalje određujemo vrijednosti visina za određene vrijednosti protoka.

Za $Q=90\text{m}^3/\text{s}$

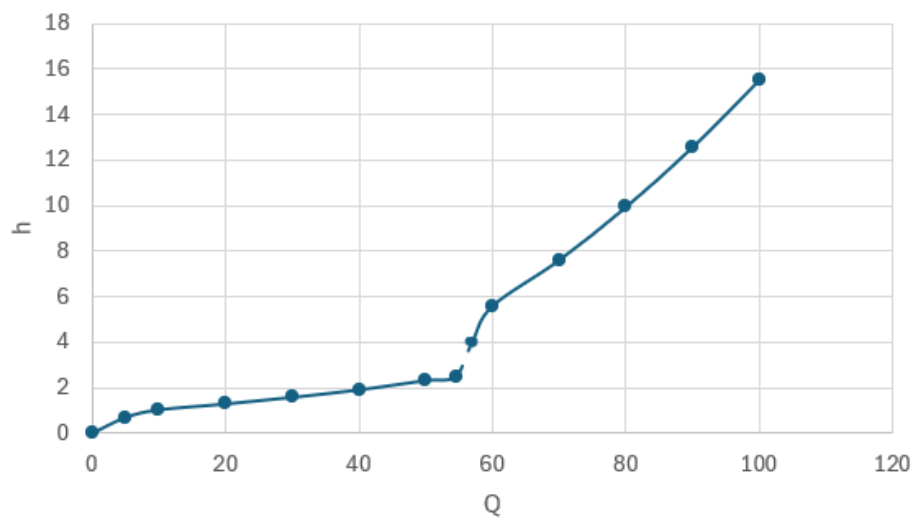
$$90 = 0,81 \cdot 7,07 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot \Delta h}$$

$$\Delta h = 12,57 \text{ m}$$

Tablica 5: Q-h

Q/[m ³ s ⁻¹]	h/[m]
100	15,52
90	12,57
80	9,94
70	7,61
60	5,59

h-Q



Slika 16: Prikazuje promjene visine i protoka u različitim uvjetima tečenja.

Da bi bili na strani sigurnosti za visinu zagata uzimamo vrijednost: $\Delta h = 16,5 \text{ m}$.

5. ZAKLJUČAK

Kroz analizu općih karakteristika tunela, kao što su njihova namjena, poprečni profil, uzdužni pad nivelete i obloge, postavljeni su temelji za dublje razumijevanje njihove funkcionalnosti u različitim hidrotehničkim projektima.

Uz detaljnu analizu triju vrsta tunela prema uvjetima tečenja: tečenja sa slobodnim vodnim licem, tečenja s promjenjivim režimom tečenja i tečenja pod tlakom. Ovi uvjeti značajno utječu na projektiranje tunela jer različiti režimi tečenja zahtijevaju posebne pristupe proračunu dimenzija i stabilnosti konstrukcije.

Na temelju proračuna, dan je primjer dimenzioniranja obilaznog tunela za zaštitu gradilišta od vode. Postavili smo uvjete za kritično strujanje, odredili smo potreban promjera tunela i visine uzvodnog zagata kako bi se osigurala sigurnost i stabilnost konstrukcije uz postojeće uvjete tečenja. Pretpostavka da će se povećanjem visine slobodnog lica smanjivati promjer tunela potvrđena je kroz proračune, dok je visina uzvodnog zagata pokazala ovisnost o maksimalnom mogućem protoku vode.

POPIS LITERATURE

- [1] STOJIĆ, Petar. Hidrotehničke građevine, Knjiga 2. Zagreb: Institut Građevinarstva Hrvatske, Conex, Elektroprojekt, Hidroprojekt-ING, Konstruktor Inženjering, Moho, 1998.
- [2] Kuspilić, Neven, i Eva Ocvirk. Hidrotehničke građevine. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 3 February 2017.
- [3] Internetska stranica: <https://www.dubrovackidnevnik.rtl.hr/vijesti/grad/bili-smo-u-tunelu-ispod-srda-kroz-koji-prolazi-dubrovacka-pitka-voda-procitajte-sto-se-planira-sanirati-foto-video> [pristupljeno 01.08.2024]
- [4] Internetska stranica: <https://www.alcosan.org/clean-water-plan/regional-tunnel-system> [pristupljeno 03.08.2024]
- [5] Zabuski, Leslaw. (2019). Construction of Pressure Tunnels. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics. 66. 77-100. 10.1515/heem-2019-0006.
- [6] Lakoš P. Izvedba hidrotehničkog tunela Stupe. Građevinar. 2004 56(02.): 61-68. Dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/10170> [pristupljeno 05.08.2024.]
- [7] Prezentacija dostupno na internetskoj stranici: https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_13190/objava_19716/fajlovi/4_DimenzioniranjeOgranicenja.pdf [pristupljeno 01.08.2024]
- [8] Internetska stranica: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana> [pristupljeno 01.08.2024]
- [9] Prezentacija Građevinskog fakulteta Zagreb o hidrotehničkim građevinama, dostupno na internetskoj stranici: https://www.grad.hr/nastava/hidrotehnika/gf/hidrotehnicke_graevine/nastavni_materijali/Dio1/HG_Kuspilic_dio1_2009_ppt.pdf [pristupljeno 01.08.2024]
- [10] Ilijaš, Lea. Nova Austrijska tunelska metoda, NATM. diplomski rad, SVEUČILIŠTE U ZAGREBU, GEOTEHNIČKI FAKULTET. Internetska stranica: <https://core.ac.uk/download/pdf/197487483.pdf> [pristupljeno 03.09.2024]
- [11] Maričević, Srđan. Određivanje osnovnih komponenti za izgradnju male hidroelektrane, diplomski rad, SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU, GRAĐEVINSKI FAKULTET OSIJEK Internetska stranica: <https://core.ac.uk/download/pdf/197487483.pdf> [pristupljeno 03.09.2024]
- [12] Internetska stranica: https://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI_13.predavanje_Tunelogradnja.pdf [pristupljeno 03.09.2024]
- [13] Stanković, Mirko. Poboljšanje stenskih masa, sidrenje (Ankerisanje), Internetska stranica: https://www.researchgate.net/profile/Mirko-Stankovic/publication/342347085_Poboljsanje_stenskih_masa_Rock_improvement_Sidrenje_ankerisanje_stenskih_masa/links/5eef5378a6fdcc73be909a17/Poboljsanje-

[stenskih-masa-Rock-improvement-Sidrenje-ankerisanje-stenskih-masa.pdf](#) [pristupljeno 03.09.2024]

[14] Internetska stranica:

https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana_Rijeka#/media/Datoteka:HE_Rijeka-dovodni_tunel.jpg [pristupljeno 13.9.2024]

[15] Prezentacija Građevinskog fakulteta Zagreb na predmetu Mehanika tekućina, dostupno na internetskoj stranici: <https://www.grad.unizg.hr/predmet/mehtek> [pristupljeno 13.9.2024]

POPIS SLIKA

Slika 1: Primjer hidrotehničkog tunela(Izvor: [12]).....	5
Slika 2: Primjer infrastrukture hidrotehničkog tunela koji služi za opskrbu vode grada Pittsburgh, USA (Izvor: [4])	6
Slika 3: Shema reverzibilne HE Rijeka (Izvor: [11], Slika 3.)	9
Slika 4: Poprečni profil dovodnog tunela hidroelektrane Rijeka (Izvor: [14])	9
Slika 5.: Hidrotehnički tunel koji je prokopan ispod brda Srđ te izlazi u blizini zgrade Vodovoda Dubrovnik radi daljnje vodoopskrbe cijelog Grada (Izvor: [3])	11
Slika 6.: Primjer vodonepropusne obloge hidrotehničkog tlačnog tunela (Izvor: [5])	12
Slika 7.: Izgled završne obloge od mlaznog betona napravljenog na hidrotehničkom tunelu Stupe (Izvor: [6])	13
Slika 8.: Grafički prikaz jednolikoga tečenja (Izvor: [7])	14
Slika 9: Karakteristični profili tunela sa slobodnim vodnim licem (Izvor: [1], slika 4.2.38)	16
Slika 10: Hidrauličke karakteristike koritastog, jajolikog i potkovičastog profila (Izvor: [1], slika 4.2.34).....	17
Slika 11: Stijenska masa kao glavni nosivi element (Izvor: [10], Slika 3.1)	19
Slika 12: Shema metode poboljšanja stijenskih masa (Izvor: [13], Slika 8.)	21
Slika 13: Strujanje pod tlakom u kružnim cijevima (Izvor: [15])	22

POPIS TABLICA

Tablica 1.: Vrijednosti koeficijenta glatkosti K (Izvor: [1], tablica 4.2.5)	20
Tablica 2: Postupak određivanja hidrauličkih gubitaka (Izvor: [1]).....	24