

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



**ANAMARIJA PLESTENJAK**

**VZDRŽEVANJE IN REKONSTRUKCIJA PREČNIH  
OBJEKTOV NA PRIMERU KAMNIŠKE BISTRICE**

**MAGISTRSKO DELO**

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE  
STOPNJE VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO**

Ljubljana, 2021

Univerza  
v Ljubljani Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Kandidatka:

**ANAMARIJA PLESTENJAK**

# **VZDRŽEVANJE IN REKONSTRUKCIJA PREČNIH OBJEKTOV NA PRIMERU KAMNIŠKE BISTRICE**

Magistrsko delo št.:

## **MAINTENANCE AND RECONSTRUCTION OF WEIRS ON THE CASE OF KAMNIŠKA BISTRICA**

Master thesis No.:

**Mentor:**

doc. dr. Simon Rusjan

**Predsednik komisije:**

**Somentor:**

viš. pred. dr. Jošt Sodnik

**Član komisije:**

Ljubljana, 2021

## **STRAN ZA POPRAVKE**

## BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

|                         |                                                                                                                                                           |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>UDK:</b>             | 556.537(282)(497.4)(043.3)                                                                                                                                |
| <b>Avtor:</b>           | Anamarija Plestenjak, dipl. inž. ok. grad. (UN)                                                                                                           |
| <b>Mentor:</b>          | doc. dr. Simon Rusjan                                                                                                                                     |
| <b>Somentor:</b>        | viš. pred. dr. Jošt Sodnik                                                                                                                                |
| <b>Naslov:</b>          | Vzdrževanje in rekonstrukcija prečnih objektov na primeru Kamniške Bistrice                                                                               |
| <b>Tip dokumenta:</b>   | Magistrsko delo – univerzitetni študij                                                                                                                    |
| <b>Obseg in oprema:</b> | 77 str., 0 preg., 48. sl., 0 pril.                                                                                                                        |
| <b>Ključne besede:</b>  | Odstranitev prečnih objektov iz vodotoka, prečni objekti, vzdrževanje in rekonstrukcija prečnih objektov, Kamniška Bistrica, značilnosti prečnih objektov |

## IZVLEČEK

Slovenija velja za eno izmed bolj vodnatih držav v Evropi. Zaradi svoje lege je večinoma rek in potokov hudourniške narave, kar pomeni, da je tvorba in koncentriranje padavinskega odtoka hitro. Ob obilnejših padavinah nastanejo močni površinski tokovi, ki pri velikih padcih tvorijo mogočne in tudi rušilne pretoke, ki ogrožajo ne samo lastnino, ampak tudi življenja. Z različnimi posegi v vodno telo zmanjšamo vzdolžni naklon struge, kot tudi zagotavljamo boljšo pretočnost struge, varnost ljudem, preprečujemo poplavljanje brežin, varujemo okolje in naravo. Ti posegi so lahko izvedeni v sami strugi vodotoka ali pa v njenem priobalnem pasu. Med posege, izvedene v sami strugi vodotoka, pogosto spadajo tudi prečni objekti. Prečni hidromorfološki elementi kot so npr. drče in brzice pa se v okolju pojavljajo tudi kot posledica naravne dinamike hidravličnih in erozijskih razmer. Njihova prisotnost v vodnem okolju je tako nekaj povsem običajnega.

V magistrski nalogi smo se posvetili prečnim objektom, predvsem pa presoji potencialnega vpliva njihove odstranitve na hidravlične razmere v strugah vodotokov. V prvem delu smo predstavili osnovne značilnosti prečnih objektov, njihove lastnosti, na kaj moramo biti pozorni pri njihovem umeščanju in omejitve. Prav tako so predstavljene enačbe za projektiranje prečnih objektov v strugi vodotoka. V drugem delu smo na konkretnem prečnem objektu (drči) na Kamniški Bistrici predpostavili različne scenarije preoblikovanja struge po odstranitvi objekta. Ugotavljali smo, na kakšen način se spreminjajo hidravlične razmere v strugi, pri čemer je bil poudarek na poteku gladin, hitrostih in strižnih napetostih na posameznem odseku.

Zavedati se je treba, da odstranitev prečnega objekta v strugi vodotoka pogosto lahko povzroči kompleksne spremembe hidravličnih razmer v strugah vodotokov. Vsak vodotok je unikaten na svoj način, zato je potrebno za vsak primer posebej preučiti način preoblikovanja struge. Na konkretnem primeru odstranitve drče na Kamniški Bistrici smo predpostavili pet različnih scenarijev preoblikovanja struge. Rezultati med seboj so si bili podobni, vendar pa so bila med njimi tudi bistvena odstopanja. Pri tem je potrebno dodobra poznati hidravlične lastnosti vodnega toka ter hidromorfološke karakteristike vodnega okolja za določitev potencialno najslabšega scenarija preoblikovanja struge.

## BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

|                         |                                                                                                                                      |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>UDC:</b>             | 556.537(282)(497.4)(043.3)                                                                                                           |
| <b>Author:</b>          | Anamarija Plestenjak, B Sc.                                                                                                          |
| <b>Supervisor:</b>      | Assist. Prof. Simon Rusjan, Ph. D.                                                                                                   |
| <b>Co-supervisor:</b>   | Sen. Lect. Jošt Sodnik, Ph. D.                                                                                                       |
| <b>Title:</b>           | Maintenance and reconstruction of weirs on the case of Kamniška Bistrica                                                             |
| <b>Document type:</b>   | Master Thesis – University studies                                                                                                   |
| <b>Scope and tools:</b> | 77 p., 3 tab., 28 fig., 0 app.                                                                                                       |
| <b>Keywords:</b>        | weir removal, maintenance and reconstruction of weirs, study case on Kamniška Bistrica, chutes in a stream, characteristics of weirs |

## ABSTRACT

Slovenia is considered as one of the most water-abundant countries in Europe. Due to its location, most rivers and streams have steep watercourses, which means that there is a rapid formation and concentration of rainfall runoff. During heavy rains, strong surface currents are formed, which on steep terrain form powerful and destructive flows which may endanger property and lives. Through various interventions in the water bodies, we reduce the longitudinal slope of the watercourse as well as ensure better hydraulic conditions, improve safety for people, prevent bank flooding and protect the environment and nature. These interventions can be carried out in the watercourse itself, or in its surrounding riparian areas. Interventions carried out in the watercourse often include construction of weirs. Rapids and chutes also occur in the environment as a result of the natural dynamics of hydraulic and erosion conditions. Their presence in the aquatic environment is thus something quite common.

In the master's thesis, we focused on weirs, especially the impact of their removal on the hydraulic conditions in the watercourse. In the first part, we presented the basic characteristics of weirs, their properties, what factors we need to consider when placing them in an environment and potential limitations. Equations for the design of weirs in the watercourse are also presented. In the second part, we analysed different scenarios of riverbed transformation after the removal of an existing weir (a chute) in the Kamniška Bistrica river. We analysed how the hydraulic conditions in the riverbed change, with an emphasis on the water levels, velocities and shear stresses along the studied section.

It should be noted that the removal of a weir in a watercourse can often lead to complex changes in the in-stream channel hydraulic conditions. Each watercourse is unique, so it is necessary to study the method of riverbed transformation on a case-by-case basis. In the practical example of the removal of the chute in Kamniška Bistrica, we assumed five different scenarios for the transformation of the riverbed. Overall, the results were similar, but there were also significant differences between the resulting hydraulic condition. Therefore, it is necessary to understand the hydraulic characteristics and hydromorphology of the aquatic environment to determine the potential worst-case scenario of watercourse channel hydromorphology transformation.

## **ZAHVALA**

Pri izdelavi magistrskega dela se zahvaljujem svojemu mentorju doc. dr. Simonu Rusjanu za strokovno pomoč, usmeritev in ključne napotke. Prav tako se zahvaljujem somentorju, viš. pred. dr. Joštu Sodniku za pomoč pri izdelavi praktičnega dela.

Zahvaljujem se vsem kolegom in prijateljem, ki so mi nudili pomoč tekom magistrskega študija in pisanjem magistrskega dela.

Posebna zahvala gre mojim staršem, ki so me spodbujali in nudili podporo, ki sem jo potrebovala tekom študija na gradbeni fakulteti in pisanjem magistrskega dela.

## KAZALO VSEBINE

|         |                                                                         |    |
|---------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 1       | UVOD .....                                                              | 1  |
| 1.1     | Cilji magistrske naloge .....                                           | 2  |
| 2       | SPLOŠNO O HIDROTEHNIČNIH OBJEKTIH.....                                  | 3  |
| 2.1     | Vzdolžni objekti .....                                                  | 3  |
| 2.2     | Prečni objekti .....                                                    | 4  |
| 3       | ZAKONODAJNA IZHODIŠČA IN ORGANIZIRANOST UPRAVLJANJA Z VODAMI .....      | 5  |
| 3.1     | Obvezna državna gospodarska javna služba na področju urejanja voda..... | 5  |
| 3.2     | Gradbeni zakon.....                                                     | 6  |
| 3.3     | Zakon o vodah.....                                                      | 7  |
| 3.4     | Zakon o varstvu okolja .....                                            | 8  |
| 4       | VRSTE PREČNIH OBJEKTOV V STRUGAH VODOTOKOV .....                        | 9  |
| 4.1     | Jezovna zgradba .....                                                   | 9  |
| 4.2     | Prag.....                                                               | 11 |
| 4.3     | Drča .....                                                              | 12 |
| 5       | PODROBNEJŠI PREGLED VLOG PREČNIH OBJEKTOV .....                         | 13 |
| 5.1     | Funkcija prečnih objektov.....                                          | 13 |
| 5.1.1   | Uravnavanje višine vode .....                                           | 13 |
| 5.1.2   | Meritve pretokov.....                                                   | 18 |
| 5.1.3   | Hidromorfološki procesi in stabilizacija struge .....                   | 19 |
| 5.1.4   | Uravnavanje odtočnih razmer v strugi .....                              | 20 |
| 5.1.4.1 | Hidravlični vodni skok .....                                            | 21 |
| 5.1.4.2 | Podslapje .....                                                         | 23 |
| 5.1.4.3 | Tolmuni .....                                                           | 26 |
| 5.1.5   | Trdnost .....                                                           | 28 |
| 5.1.5.1 | Hidrostatični tlak.....                                                 | 28 |
| 5.1.5.2 | Hidrodinamični tlak .....                                               | 28 |
| 5.1.6   | Okoljski vidiki .....                                                   | 29 |
| 5.1.7   | Ribje steze .....                                                       | 30 |
| 5.1.8   | Komercialne namene.....                                                 | 31 |
| 5.1.9   | Zagotavljanje varnosti.....                                             | 31 |
| 6       | SANACIJA PREČNIH OBJEKTOV .....                                         | 33 |
| 6.1     | Obnova prečnih objektov .....                                           | 33 |
| 6.2     | Možne sanacije.....                                                     | 33 |
| 6.2.1   | Odstranitev ali znižanje.....                                           | 34 |
| 6.2.2   | Obnova, prenova ali popravila.....                                      | 36 |

|       |                                                                                                          |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.2.3 | Zamenjava starega objekta z izgradnjo novega objekta.....                                                | 37 |
| 6.3   | Posledice odstranitve prečnega objekta na strugo vodotoka.....                                           | 38 |
| 6.4   | Preoblikovanje struge vodotoka po odstranitvi prečnega objekta iz vodotoka .....                         | 39 |
| 6.5   | Omejitve izvajanja sanacijskih del v vodotoku.....                                                       | 43 |
| 6.5.1 | Finančna sredstva .....                                                                                  | 44 |
| 6.5.2 | Lastništva prečnih objektov.....                                                                         | 45 |
| 6.5.3 | Ekološka presoja.....                                                                                    | 46 |
| 7     | PRESOJA VPLIVOV ODSTRANITVE PREČNEGA OBJEKTA NA KAMNIŠKI BISTRICI .....                                  | 47 |
| 7.1   | Hidrološke značilnosti vodotoka.....                                                                     | 47 |
| 7.2   | Metode dela.....                                                                                         | 48 |
| 7.3   | Predhodno in obstoječe stanje.....                                                                       | 48 |
| 7.4   | Izdelava hidravličnega modela.....                                                                       | 52 |
| 7.4.1 | 1D model.....                                                                                            | 53 |
| 7.4.2 | 2D model.....                                                                                            | 53 |
| 7.5   | Predpostavljeni vplivi spremembe poteka dna struge vodotoka v primeru odstranitve prečnega objekta ..... | 56 |
| 8     | REZULTATI, ANALIZA IN KONČNE UGOTOVITVE.....                                                             | 60 |
| 8.1   | Rezultati izračunov z uporabo 1D modela struge.....                                                      | 60 |
| 8.2   | Rezultati izračunov z uporabo 2D modela struge.....                                                      | 66 |
| 8.3   | Končne ugotovitve .....                                                                                  | 71 |
| 9     | ZAKLJUČEK .....                                                                                          | 72 |



## KAZALO SLIK

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1: Primer prečnega objekta v strugi vodotoka in njegovega vpliva na gladinska stanja - jez (Reddy, 2021).        | 9  |
| Slika 2: Določitev višine spodnje gladine (Horvat, 2010).....                                                          | 10 |
| Slika 3: Globina erozijskega tolmana (Steinman, 2010).....                                                             | 10 |
| Slika 4: Popoln preliv čez prečni objekt (Tracy, 1957).....                                                            | 11 |
| Slika 5: Prelivanje v času visokovodnega dogodka (Tracy, 1957). ....                                                   | 11 |
| Slika 6: Primer vgrajene zagatnice pri drči (Kryžanowski, 2020). ....                                                  | 12 |
| Slika 7: Prelivanje čez prečni objekt, ob majhnem oz. visokovodnem dogodku (CIRIA, 2013).....                          | 16 |
| Slika 8: Nepopoln preliv (Steinman, 2010).....                                                                         | 17 |
| Slika 9: Prelivanje čez prečni objekt (Chanson, 2004). ....                                                            | 17 |
| Slika 10: Hrapava drča (Steinman, 2010). ....                                                                          | 18 |
| Slika 11: Vpliv prečnega objekta na hidromorfološke procese v strugi vodotoka (CIRIA, 2013).....                       | 19 |
| Slika 12: Shieldsov diagram (Miedema, 2010). ....                                                                      | 20 |
| Slika 13: Izničevanje energije (Chanson, 1998). ....                                                                   | 22 |
| Slika 14: Tipi vodnih skokov (Kryžanowski, 2021). ....                                                                 | 22 |
| Slika 15: Primer valovitega hidravličnega skoka (Jevtić, 1978).....                                                    | 24 |
| Slika 16: Primer geometrije podslapja – USBR II (Padulano, 2017).....                                                  | 26 |
| Slika 17: Hidrostatične razporeditve sil na objekt (Markič, 2012). ....                                                | 29 |
| Slika 18: Primer možnih vplivov, ki nastanejo po odstranitvi prečnega objekta iz vodotoka (Rickard, 2003). ....        | 35 |
| Slika 19: Spreminjanje dna struge po odstranitvi prečnega objekta iz struge vodotoka (Bond, 2013). ....                | 38 |
| Slika 20: Primer odstranjenega objekta na Danskem prej (levo) in potem (desno) (AMBER, 2020).....                      | 42 |
| Slika 21: Delovanje Sklada za vode (Bizjak, 2010).....                                                                 | 45 |
| Slika 22: Pregledna karta – lokacija obravnavanega pragu (Geopedija, 2021). ....                                       | 49 |
| Slika 23: DOF posnetek iz leta 2006 obravnavanega odseka in porušenim pragom (Tempos d.o.o., 2018). ....               | 50 |
| Slika 24: Dolvoden pogled na porušen prag (Tempos d.o.o., 2018).....                                                   | 50 |
| Slika 25: Dolvodni pogled na zajedo na levi brežini in prodišče (Tempos d.o.o., 2018). ....                            | 51 |
| Sliki 26 in 27: Gorvodni pogled na obnovljeno drčo; levo in dolvodni pogled na strugo; desno (osebni arhiv, 2021)..... | 52 |
| Slika 28: Vzдолžni profil obstoječega stanja s pragom pri strugotvornem pretoku. ....                                  | 53 |
| Slika 29: Prikaz območja obdelave (z modro).....                                                                       | 54 |
| Slika 30: Prikaz zgoščene mreže za namen 2D modela. ....                                                               | 55 |
| Slika 31: Hidrogram odtoka pri največjem strugotvornem pretoku.....                                                    | 55 |
| Slika 32: Vzдолžni profil predvidenega stanja za prvi scenarij. ....                                                   | 57 |
| Slika 33: Vzдолžni profil predvidenega stanja za drugi scenarij.....                                                   | 58 |
| Slika 34: Vzдолžni profil predvidenega stanja za tretji scenarij. ....                                                 | 58 |
| Slika 35: Vzдолžni profil predvidenega stanja za četrti scenarij.....                                                  | 59 |
| Slika 36: Vzдолžni profil predvidenega stanja za peti scenarij.....                                                    | 60 |
| Slika 37: Grafični prikaz spremembe v poteku dna vodotoka. ....                                                        | 61 |
| Slika 38: Grafični prikaz spremembe poteka gladin vodotoka. ....                                                       | 62 |
| Slika 39: Grafični prikaz spremembe pretočne hitrosti v vodotoku.....                                                  | 63 |
| Slika 40: Grafični prikaz spremembe strižne napetosti v vodotoku.....                                                  | 64 |
| Slika 41: Grafični prikaz spremembe pretočne hitrosti v vodotoku.....                                                  | 65 |
| Slika 42: Grafični prikaz spremembe strižne napetosti v vodotoku.....                                                  | 65 |
| Slika 43: Vzдолžni profil gladine in terena pri pretoku $Q_{stru}$ . ....                                              | 67 |
| Slika 44: Prikaz razlike gladin med obstoječim stanjem in predpostavljenim prvim scenarijem. ....                      | 67 |
| Slika 45: Vzдолžni profil pretočne hitrosti pri pretoku $Q_{stru}$ ; 2D model.....                                     | 68 |
| Slika 46: Vzдолžni profil strižne napetosti pri pretoku $Q_{stru}$ ; 2D model.....                                     | 69 |
| Slika 47: Vzдолžni profil pretočnih hitrosti pri pretoku $Q_{stru}$ ; 2D model.....                                    | 70 |
| Slika 48: Vzдолžni profil strižne napetosti pri pretoku $Q_{stru}$ ; 2D model.....                                     | 70 |

## LIST OF FIGURES

|                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1: An example of a weir in a watercourse and its effect on the surface condition – a dam (Reddy, 2021)..                                            | 9  |
| Figure 2: Determination of the height of the lower water (Horvat, 2010). .....                                                                             | 10 |
| Figure 3: The depth of the erosion pool (Steinman, 2010). .....                                                                                            | 10 |
| Figure 4: Free flow over a weir (Tracy, 1957). .....                                                                                                       | 11 |
| Figure 5: Submerged flow during a high-water event (Tracy, 1957). .....                                                                                    | 11 |
| Figure 6: An example of a build-in in a chute (Kryžanowski, 2020). .....                                                                                   | 12 |
| Figure 7: Pouring over a weir, at a small and high-water event (CIRIA, 2013). .....                                                                        | 16 |
| Figure 8: Incomplete topping (Steinman, 2010). .....                                                                                                       | 17 |
| Figure 9: Spilling over a weir (Chanson, 2004). .....                                                                                                      | 17 |
| Figure 10: Rough stepped weir (Steinman, 2010). .....                                                                                                      | 18 |
| Figure 11: Impact of a weir on a hydro morphological processes in river hydraulics (CIRIA, 2013). .....                                                    | 19 |
| Figure 12: Shields diagram (Miedema, 2010). .....                                                                                                          | 20 |
| Figure 13: Energy dissipation (Chanson, 1998). .....                                                                                                       | 22 |
| Figure 14: Types of water jumps (Kryžanowski, 2021). .....                                                                                                 | 22 |
| Figure 15: An example of a corrugated hydraulic jump (Jevtić, 1978). .....                                                                                 | 24 |
| Figure 16: Example of sub-waterfall geometry - USBR II (Padulano, 2017). .....                                                                             | 26 |
| Figure 17: Hydrostatic distributions of forces on a weir (Markič, 2012). .....                                                                             | 29 |
| Figure 18: Examples of impacts that may result from the removal of a weir (Rickard, 2003). .....                                                           | 35 |
| Figure 19: Changing the riverbed after removing a weir from the watercourse (Bond, 2013). .....                                                            | 38 |
| Figure 20: Example of a removed weir in Denmark before (left) and after (right) (AMBER, 2020). .....                                                       | 42 |
| Figure 21: Operation of the Water Fund in Slovenia (Bizjak, 2010). .....                                                                                   | 45 |
| Figure 22: Overview map - location of the considered weir (Geopedija, 2021). .....                                                                         | 49 |
| Figure 23: DOF image (2006) of section under consideration and weir removal (Tempos d.o.o., 2018). .....                                                   | 50 |
| Figure 24: Downstream view of the ruined weir (Tempos d.o.o., 2018). .....                                                                                 | 50 |
| Figure 25: Downstream view of the ravine on the left bank and gravel (Tempos d.o.o., 2018). .....                                                          | 51 |
| Figure 26 and 27: Upstream view of a renovated stepped weir; left and Downstream view of a stream Kamniška Bistrica; right (personal archive, 2021). ..... | 52 |
| Figure 28: Longitudinal profile of the existing weir with a maximum flow. ....                                                                             | 53 |
| Figure 29: Display of the processing area (in blue). .....                                                                                                 | 54 |
| Figure 30: Display of a condensed grid for the purpose of a 2D model. ....                                                                                 | 55 |
| Figure 31: Outflow hydrograph at maximum flow in the stream. ....                                                                                          | 55 |
| Figure 32: Longitudinal profile of the predicted condition for the first possibility. ....                                                                 | 57 |
| Figure 33: Longitudinal profile of the predicted condition for the second possibility. ....                                                                | 58 |
| Figure 34: Longitudinal profile of the predicted condition for the third possibility. ....                                                                 | 58 |
| Figure 35: Longitudinal profile of the predicted condition for the fourth possibility. ....                                                                | 59 |
| Figure 36: Longitudinal profile of the predicted condition for the fifth possibility. ....                                                                 | 60 |
| Figure 37: Graphic representation of the channel bottom change along the studied section. ....                                                             | 61 |
| Figure 38: Graphic representation of the water elevation change along the studied section. ....                                                            | 62 |
| Figure 39: Graphic representation of the flow velocity change along the studied section. ....                                                              | 63 |
| Figure 40: Graphic representation of the shear stress change along the studied section. ....                                                               | 64 |
| Figure 41: Graphic representation of the change in the course for the flow velocity. ....                                                                  | 65 |
| Figure 42: Graphic representation of the change in the course for the shear stress. ....                                                                   | 65 |
| Figure 43: Graphic representation of the water elevation change along the studied section. ....                                                            | 67 |
| Figure 44: The difference in WSE between existing situation and the first scenario. ....                                                                   | 67 |
| Figure 45: Graphic representation of the flow velocity change along the studied section.; 2D model. ....                                                   | 68 |
| Figure 46: Graphic representation of the shear stress change along the studied section. ....                                                               | 69 |
| Figure 47: Graphic representation of the change in the course for the flow velocity. ....                                                                  | 70 |
| Figure 48: Graphic representation of the change in the course for the shear stress; 2D model. ....                                                         | 70 |

## 1 UVOD

Človeštvo se je že od nekdaj naseljevalo vzdolž večjih in manjših vodotokov. Tako večje reke kot tudi manjši potoki so predstavljali plovne poti in hkrati tudi edine pomembne prometne poti, po katerih so transportirali osnovne surovine. Po drugi strani, so vodotoki predstavljali stalno ali občasno nevarnost za prebivalce, ker so redno prestopali brežine in poplavljali. Z reguliranjem vodotokov, ki je oblika urejanja vodotokov, so se izognili in zmanjšali nevarnosti zaradi poplavljanja ter zagotovili ustrezne ureditvene ukrepe nekaterih odsekov, ki so služili za plovbo, osuševanje močvirij ali intenzivnejšo izrabo poplavnih ravnin. Skupaj z inženirsko dejavnostjo je sestavni del urejanja vodnega režima [Mikoš, 2007].

Namen urejanja vodotokov je, da znamo oceniti stabilnost dna in brežin vodotoka glede na podane hidrološke značilnosti območja in na podlagi tega določiti nujnost ureditvenih ukrepov. Pri urejanju vodotokov je pomembno, da se oceni zunanje vplive na vodni režim v vodotoku in zna preprečiti oziroma omiliti negativne posledice le teh. Potrebno je spoznati možne ureditvene posege in ukrepe v vodnem režimu, njihove potencialne posledice ter jih z upoštevanjem le-teh ustrezno načrtovati. Pri tem ni pomembno ali gre le za lokalne ukrepe stabilizacije ali ureditve vzdolž daljših odsekov vodotokov. Pri vsakem predlogu nove rešitve je potrebno upoštevati različne interese. Kot primer si lahko zamislimo situacijo, da želijo naravovarstveniki in ribiči zaščititi ter tako izboljšati habitatne razmere za vodne organizme. Medtem ko je naloga inženirjev, da uredijo strugo vodotoka tako, da le ta ni problematična z vidika poplavne varnosti. V primeru nasprotovanj je priporočeno prikazati prednosti in slabosti posamezne rešitve z nasprotujočih se vidikov in izbrati najprimernejšo kombinacijo v dani situaciji.

Neposredni cilj ureditvenih ukrepov v strugi vodotoka je torej ureditev same struge vodotoka na način, da prevaja načrtovani pretok, pri čemer se struga vodotoka stabilizira ob upoštevanju prisotnosti erozijskih razmer ter procesov premeščanja plavin. Ukrepe lahko delimo v tri skupine in sicer so lahko sanacijski, nadomestni ali obogatitveni ukrepi [Steinman, 2008]. Sanacijski ukrepi so potrebni, ko se kažejo znaki nestabilnosti in neurejenosti na obvodnih in vodnih objektih ter neprimerni življenjski pogoji vodnim organizmom. Nadomestni ukrepi so izvedeni, ko ni možna neposredna sanacija, in se s posebnimi ureditvami sanirajo negativne posledice na drugih lokacijah. S postavitvijo novih elementov v prostor zagotavljamo obogatitvene ukrepe.

Zaščita vodotoka pred škodljivim delovanjem voda dosežemo z gradbenimi in ne-gradbenimi ukrepi. Pred poplavami in prekomerno erozijo se izognemo z izgradnjo nasipov, zadrževalnikov ali pomožnih kanalov, ki spadajo pod gradbene ukrepe. Ne-gradbeni ukrepi pa zajemajo predvsem preventivne ukrepe, kot na primer smotrno načrtovanje rabe prostora ob upoštevanju z vodo povezanih procesov v okolju. S premišljenim prostorskim načrtovanjem preprečimo prekomerno škodo ob nastopu visokovodnih dogodkov.

Pred samim začetkom regulacije vodotoka, je potrebno izvesti hidravlični izračun obstoječe struge in v primeru, da hidravlična prevodnost ni ustrezna, je potrebno izvesti primerne regulacijske ukrepe, ki to zagotavljajo. Ustrezna prevodnost vodotoka je običajno zagotovljena z naslednjimi regulacijskimi ukrepi: z izkopi ali z izgradnjo visokovodnih nasipov zagotovimo povečanje površine prečnega prereza, sprememba v hrapavosti ostenja, sprememba hidravličnega radija, ter lahko povečamo padec dna struge [Steinman, 2008]. Alternativna rešitev reguliranja vodotokov je lokalna preusmeritev visokih voda, z namenom varstva pred poplavnimi vodami.

V okviru različnih posegov v struge vodotokov je bila izgradnja prečnih objektov v preteklosti zelo pogosta. Uporabljajo se za različne namene rabe voda (npr. pridobivanje energije, zagotavljajo poplavno

varnost ali se uporabljajo za rekreacijske namene). Negativni učinki prečnih objektov se odražajo predvsem na omejitvah, ki jih tovrstni objekti predstavljajo za migracijo organizmov vzdolž struge vodotokov. V ta namen so se na tem področju razvijale in izboljšale različne inženirske rešitve načrtovanja ribjih prehodov. S hidravlično ustrezno načrtovano ribjo stezo je bila omogočena prehodnost rečnim organizmom.

V času iskanja rešitev za varovanje narave in preprečevanje segrevanja ozračja pripisujemo velik pomen trajnostnemu razvoju. S takšnim ravnanjem v okolju, varujemo naravo in bivalni prostor, v katerem živimo. Vse ureditve, ki jih načrtujemo morajo biti takšne, da imajo minimalne vplive na okolje. V ta namen iščemo celostne interdisciplinarne rešitve, za katerega uporabljamo izraz »dobra praksa«. Na področju urejanja vodotokov so to ureditve, ki prispevajo k odpornosti in vzdržnosti (vzpostavitev dinamičnega ravnovesja) v strugah vodotokov, pri tem pa imajo minimalne negativne vplive na okolje in sovpadajo s krajinskimi značilnostmi [Repnik, 2013]. Tako namesto tehničnega reguliranja, upoštevamo zakone narave in se poslužujemo sonaravnega urejanja vodotokov. Sonaravno urejanje vodotokov pomeni uporabo sonaravnih trajnostnih materialov, kot je les, kamen, gramoz in v manjši meri, kjer je to z vidika hidravličnih obremenitev neizogibno, betonske ali jeklene konstrukcije (npr. zagatnice, traverze).

## 1.1 Cilji magistrske naloge

V magistrskem delu smo se torej ukvarjali s posegi v strugo vodotoka, kjer je bil poudarek predvsem na vlogi in posledicah umestitve prečnih objektov. Z njimi zagotovimo ustrezne ureditvene ukrepe in varnost pred poplavljanjem. V prvem delu naloge so na splošno predstavljeni hidrotehnični objekti, v nadaljevanju so predstavljeni teoretični vidiki prečnih objektov, kot so: lastnosti, funkcije takšnih objektov, katere vrste obstajajo in kdaj katere uporabljamo. V tem poglavju so predstavljene tudi glavne zahteve glede načrtovanja, dimenzioniranja, izvedbe, vzdrževanja in izboljšav. Predstavljeni so zakonodajni vidiki s področja upravljanja voda, gradnjo objektov in varstva okolja. V nadaljevanju smo se osredotočili tudi na kakšen način je možno prečne objekte sanirati in njihov neposredni vpliv na vodotok in okolje v primeru popolne odstranitve iz struge vodotoka. Predstavljena je tudi problematika, ki se navezuje na omejitve izvajanja sanacijskih del na in v vodotoku.

V drugem delu magistrskega dela je bil poudarek na analizi potencialnih vplivov odstranitve prečnega objekta iz struge vodotoka, in sicer smo obravnavali stabilizacijski prag na Kamniški Bistrici. Pred nekaj leti je bil omenjeni prag spremenjen v drčo, kot sonaravna rešitev, usklajena s tamkajšnji ribiči, za namen lažjega prehoda rečnim organizmom. Na podlagi hidroloških značilnosti vodotoka in razpoložljive literature na tem področju, smo predpostavili različne scenarije, na kakšen način bi spremenil vzdolžni potek dna struge vodotoka, če bi prišlo do odstranitve prečnega objekta.

## 2 SPLOŠNO O HIDROTEHNIČNIH OBJEKTIH

Smotrno rabo in izrabo voda dosežemo z ustreznim gospodarjenjem z vodami, pri čemer je uporabljena ustrezna tehnika in tehnologija urejanja ter varovanja vodnega okolja. Dejavnosti, ki so povezane z vodami, poznamo pod pojmom vodarstvo. Hidrotehnične dejavnosti se delijo glede na namembnost objektov in ureditev. Posege, ki jih izvajamo jih delimo na posege v površinskih, tekočih in stoječih vodah, posegi v obvodnem svetu in posegi v vplivnih območjih površinskih voda [Marušič, 2005]. Vodnogospodarski posegi so posegi, ki se izvajajo v površinskih vodah. Hidrotehnični posegi zajemajo predstavitev naravne struge, sprememba pretočnega profila, ureditev in utrditev brežin, utrditev dna, zajezev in kanaliziranje [Marušič, 2005]. Postavitev prečnega objekta v strugo vodotoka tako spada pod hidrotehnični poseg.

Za hidrotehnične objekte veljajo določene skupne in specifične lastnosti [Steinman, 2008]. V preteklosti je bila gradnja jezov ena izmed primarnih hidrotehničnih dejavnosti. Šele ko je bila zadoščena zadostna stopnja organiziranosti družbe, je bila možna gradnja vodnogospodarskih objektov. Na gradnjo vplivajo različni dejavniki kot je hidrologija, geologija, načrtovanje in sama gradnja objektov. Ti objekti imajo velik pomen še danes.

Pri umestitvi hidrotehničnih objektov v prostor moramo presoditi vpliv zgradb na vodo ter vpliv samega objekta na okolje, na kakšen način njihova postavitve vpliva na premostitveno sposobnost vodotoka, kajti potrebno je upoštevati, da je gradnja objektov lahko dolgotrajna in v primeru izgradnje akumulacije zavzamejo veliko prostora.

Glede na namen delimo hidrotehnične objekte na uporabniške vodogradnje in varovalne vodogradnje. Uporabniške vodogradnje se nanašajo na vodooskrbno sposobnost prebivalstva, namakanje, izrabo vodnih moči, vodni transport in rekreacijo. Na drugi strani pa z varovalnimi vodogradnjami zaščitimo vodo pred človeškimi vplivi, zaščito človeka pred vodami, zaščito objektov pred erozijo in dreniranje zemljišč ter zgradb [Steinman, 2008].

Za namen magistrskega dela so v nadaljevanju predstavljeni vzdolžni in prečni hidrotehnični objekti. Ti spadajo tako pod uporabniške kot tudi varovalne vodogradnje.

### 2.1 Vzdolžni objekti

Že v samem imenu je razvidno, da vzdolžne objekte vgrajujemo vzdolž vodotokov. Ti objekti se lahko nahajajo vzdolž leve ali desne brežine, vgrajujejo se na daljšem ali krajšem odseku odvisno od potreb po zavarovanju. S postavitvijo neprekinjenih usmerjevalnih vzdolžnih zgradb je zagotovljena ohranitev določenega tlorisnega poteka vodotoka [Steinman, 2008]. Pri enostavnem pretočnem prerezu struge vodotoka je usmerjevalna zgradba že visokovodni nasip. V primeru, da je struga poglobljena, pa obrežna utrditev prevzame vlogo usmerjevalne zgradbe. Pri meandrirajočih strugah so usmerjevalne vzdolžne zgradbe zgrajene neprekinjeno in se izmenjujejo na zunanjih brežinah struge.

Alternativne možnosti usmerjevalnih zgradb so tudi postavitve jezbic, kaštnih zgradb, v manjših strugah tudi kinet. Jezbice so vse vodne zgradbe, ki se z eno stranjo naslanjajo na brežino, druga stran pa je prečno postavljena na smer vodnega toka [Lubej, 2016], zaradi česar jih lahko umeščamo med prečne objekte. V primeru ko se upošteva niz jezbic na nekem odseku, pa jih uvrščamo med vzdolžne objekte. Jezbice se uporabijo, ko je edina možna rešitev ureditve le ob postopnem spreminjanju struge, kjer se zaradi značilnosti vodotoka zahteva postopno urejanje in pri velikih vodotokih, kjer ni možnosti

enkratne ureditve. Njihova dolžina naj ne bi presegala  $\frac{1}{3}$  širine struge vodotoka. Kinete v naravnem okolju niso zaželeni in veljajo za enega izmed najmanj primernih ukrepov. Kinetiranje se izvede, kot poglobitev dna v liniji po kateri se ob nizkih vodah pretaka voda. Uporabljajo se za zavarovanje dna in brežin struge, predvsem hudournikov [Suhadolnik, 2007]. Kašne zgradbe so predvsem lesene konstrukcije (lahko tudi v kombinaciji s kamnom), ki so sestavljene iz pilotov in brun.

## 2.2 Prečni objekti

Za razliko od vzdolžnih objektov, prečne objekte umeščamo pravokotno na prevladujočo smer gibanja vodnega toka oz. prečno na strugo vodotoka. Tako ima postavitve prečnega objekta v strugo vodotoka večji vpliv na hidravlične značilnosti, kot postavitve vzdolžnega objekta. Prečni objekti so umetno narejene konstrukcije umeščene v strugo vodotoka, čez katere se voda prelija. Predstavljajo pomembno funkcijo pri uravnavanju vodostajev in pretočnih razmer, vendar po drugi strani lahko predstavljajo tudi velik negativen vpliv na okolje. Pri tem otežujejo prehod vodnih organizmov gorvodno ter dolvodno in preprečujejo transport sedimentov. Problem nastane, ker pride do zastajanja sedimentov pred pregrado in prekomerna erozija sedimentov dolvodno od objekta. Erozija nastane kot posledica prelivanja vode čez objekt, pri čemer se pojavijo vrtinci, poveča se sama moč toka in hidravlične obremenitve na ostenje struge. Zato je pomembno, da so prečni objekti hidravlično ugodno dimenzionirani in ustrezno zavarovani s podslapji, katerih namen je izničiti prekomerno energijo vode in zmanjšanje erozije pod pregrado. V kolikor ni zagotovljena ustrezna zaščita pod objektom in pride do prekomerne erozije, lahko v skrajnih primerih pride tudi do porušitve objekta. Proces zastajanja in odnašanja sedimentov privede do porušanja naravnega ravnovesja med prinesenimi in odnesenim sedimentom [Hanania, 2020].

Prečni objekti spadajo pod grajeno javno dobro. 15. člen Zakona o vodah (UL, RS, št. 67/02) govori prav o javnem dobrem. Zakon dovoljuje, da lahko vsakdo uporablja objekte javnega dobra, v kolikor to ni škodljivo za vode, vodni režim in naravno ravnovesje vodnih ter obvodnih ekosistemov. Potrebno jih je vzdrževati, pri čemer ohranjamo njegov namen.

Prečni objekti imajo že od nekdaj pomembno vlogo pri uravnavanju pretokov za mline, plovbo po strugah vodotokov, dreniranju oziroma upravljanju s poplavnimi vodami, stabilizacijo kanalov, z njimi neposredno izboljšamo okolico samega objekta in zagotavljajo rekreacijske površine [CIRIA, 2018]. V nekaterih primerih se lahko uporabljajo tudi za komercialne namene kot je ribarjenje, hidroenergijo in odvzem za pitno vodo.

Glavni namen postavitve prečnih objektov je zmanjšanje oz. kontrola vzdolžnega padca struge vodotoka. V skrajnih primerih je edina možna ureditev s popolnim pregrajevanjem hudourniške struge, pri čemer se postavijo hudourniške pregrade v nizu, ko vsaka pregrada podpira peto naslednje gorvodno ležeče pregrade. Postavitve pregradnih objektov povzroči zmanjšanje vodne energije do take mere, da se med njimi oblikuje manjši vzdolžni padec dna struge [Repnik, 2007].

### **3 ZAKONODAJNA IZHODIŠČA IN ORGANIZIRANOST UPRAVLJANJA Z VODAMI**

Ne glede na to kakšen objekt gradimo v okolju, mora vsaka gradnja ustrezati trenutni veljavni zakonodaji. V tem poglavju so na kratko predstavljena zakonodajna izhodišča, ki se nanašajo na gradnjo prečnih objektov v strugi vodotoka.

V prvem koraku je ob načrtovanju tovrstnih objektov potrebno presoditi vplive objektov na okolje. Tovrstna presoja je potrebna povsod, kjer so predvideni večji posegi v okolje. Pri presoji objektov na okolje sodelujejo različni strokovnjaki na svojih področjih, kjer pa je relevantno, naj se že v zgodnji fazi procesa vključi lokalno prebivalstvo, saj bo objekt vključen v njihovo okolje. Glavni namen sodelovanja različnih strok in presoje vplivov na okolje je zmanjšanje negativnih vplivov na okolje in potrebno je predvideti nadomestne ukrepe za zmanjšanje negativnih vplivov [Steinman, 2008].

V Uredbi o posegih v okolje, za katere je treba izvesti presojo vplivov na okolje [UL RS, št. 51/14], se določa vrste posegov v okolje, za katere je presoja vplivov obvezna. Postopki presoje vplivov na okolje so namenjeni zlasti za presojo vplivov pregrad in jezov, poleg tega pa se v širšem smislu uporabljajo tudi za načrtovanje in dimenzioniranje ostalih hidrotehničnih objektov in inženirskih posegov v okolje, med katere spadajo tudi prečni objekti.

Pravilnik o določitvi vodne infrastrukture [UL RS, št. 46/05] določa, kateri vodni objekti, naprave ali ureditve se štejejo za vodno infrastrukturo. Vodni objekti pridobijo status vodne infrastrukture, v kolikor ti služijo izvajanju javnih služb urejanja voda ali drugih nalog upravljanja z vodami, ki jih mora izvajati država vključno z izvajanjem državnega monitoringa voda. Status vodne infrastrukture pridobijo tudi vodni objekti, ki ne služijo posebni rabi, zaradi katere je bil zgrajen. Ti so še vedno pomembni za namene urejanja voda ter ohranjanje in uravnavanje vodnih količin za oskrbo s pitno vodo regionalnega pomena.

Med vodno infrastrukturo uvrščamo vse obstoječe pregrade in jezove ter objekte, ki so namenjeni za varstvo pred škodljivim delovanjem voda. Akumulacije, zadrževalniki in pregrade spadajo pod večje objekte vodne infrastrukture, poleg njih pa so še manjši objekti, to so vodni objekti, ki varujejo brežine vodotokov in dna struge, kanali, jezovi in hudourniške pregrade, visokovodni nasipi, drče ter pragovi.

#### **3.1 Obvezna državna gospodarska javna služba na področju urejanja voda**

Ministerstvo za okolje in prostor (MOP) je v Sloveniji pristojno za področje urejanja voda. Na osnovi zahtevnih kriterijev dodelijo koncesijo tistim družbam, ki te pogoje izpolnjujejo. V njihovem imenu (MOP) je v letu 2015 koncesijo dodeljevala Agencija za okolje in prostor (ARSO). Kasneje je bila ustanovljena Direkcija Republike Slovenije za vode (DRSV) kot organ v sestavi MOP-a. DRSV je tako prevzela naloge ARSO v zvezi z delovanjem obvezne državne gospodarske službe na področju upravljanja voda. Njihov namen pa je, da pripravijo letne programe del, s katerimi spremljajo stanja, obratovanja in vzdrževanja vodne infrastrukture. S tem je zagotovljeno ohranjanje in uravnavanje vodnih količin ter varstvo pred škodljivim delovanjem voda.

V Sloveniji so porečja vodotokov z vidika koncesionarske dejavnosti razdeljena na različna območja. Izbrani koncesionar, na podlagi koncesijske pogodbe, vzdržuje vodna in priobalna zemljišča, na podlagi letnega programa gospodarske javne službe. Koncesionarji na področju urejanja voda so vodnogospodarska podjetja.

Dela, ki se izvajajo v okviru koncesijske pogodbe, obsegajo vsa vzdrževalna dela na vodotoku, skupaj z zavarovanjem, čiščenjem, košenjem in poseki. Prav tako zajemajo sanacije jezov, brežin in pragov, izgradnja kamnito betonskih pregrad, podpornih zidov in talnih pragov. Zagotovljeno je čiščenje in vzdrževanje požiralnikov in prodnih pregrad ter odstranjevanje sipin in naplavin.

Za izvajanje ustrezne gospodarske javne službe na področju urejanja voda morajo biti zaposleni določeni strokovnjaki na tem področju in sicer vodovarstveni nadzorniki, upravljavci vodne infrastrukture in projektanti.

Direkcija za vode opravlja strokovne, upravne in razvojne naloge na področju urejanja voda v skladu s predpisi, ki urejajo vode. Pri tem je pomembno, da se vzpostavi sistem, s katerim izkoristimo vodno zmogljivost kot razvojno priložnost, vodno zmogljivost pri prostorskem načrtovanju ter zmanjševati ogroženost življenj, zdravja in premoženja prebivalcev.

Glavne naloge javnih služb na področju urejanja voda so naslednje [Zakon o vodah, UL RS, št. 67/02]:

- vzdrževalna in obratovalna dela na vodnih infrastrukturah, ki so namenjena za ohranjanje in uravnavanje vodnih količin,
- vzdrževalna in obratovalna dela ter spremljanje stanja na vodnih infrastrukturah, ki so namenjena za varovanje pred škodljivim delovanjem voda,
- izredni ukrepi v času povečane ogroženosti zaradi škodljivega delovanja voda,
- vzdrževanje vodnih in priobalnih zemljišč, razen tistih, ki so obvezne državne gospodarske javne službe (morja),
- zagotavljanje vodovarstvenega območja.

Z izvajanjem javnih služb je zagotovljeno ohranjanje in uravnavanje vodnih količin, spremljanje stanja in varstva pred škodljivim delovanjem voda, vzdrževanje vodne infrastrukture, vodovarstveni režim in skrb za hidromorfološko stanje vodnega režima.

### 3.2 Gradbeni zakon

15. člen Gradbenega zakona [RL RS št. 61/17] predpisuje, da mora vsak objekt izpolnjevati osmim bistvenim zahtevam. Z njimi se zagotavlja mehansko odpornost in stabilnost, varnost pred požarom, higienska in zdravstvena zaščita ter zaščita okolja, varnost pri uporabi, zaščita pred hrupom, varčevanje z energijo in ohranjanje toplote, univerzalna graditev in raba objektov, trajnostna raba naravnih virov. Za namen magistrske naloge sta pomembna predvsem mehanska odpornost in stabilnost prečnih objektov v strugah vodotokov. Ta je zagotovljena z ustreznim projektiranjem, gradnjo, nadzorom in vzdrževanjem objektov, pri čemer ti ne smejo biti izpostavljeni med gradnjo in uporabo, kar bi lahko povzročilo porušitev celotnega ali dela gradbenega objekta ter deformacij večjih od dovoljenih ravni.

Pri obravnavi zakonodajnih vidikov obravnave hidrotehničnih objektov v vodotokih je treba omeniti tudi Uredbo o razvrščanju objektov [UL, RS, št. 37/18]. Omenjena uredba določa merila za razvrščanje enostavnih, nezahtevnih, manj zahtevnih in zahtevnih objektov. Prečne objekte lahko umestimo v katerokoli skupino, kar pa je odvisno od same velikosti objekta.

Vsi vodni objekti so državnega pomena, kar pomeni da potrebno gradbeno dovoljenje izdaja pristojno ministerstvo. Vsi gradbeno inženirski objekti, ki sestavljajo gospodarsko javno infrastrukturo, se evidentirajo v katastru gospodarske javne infrastrukture. Gradbeno inženirski objekti so objekti, ki ni stavba ali drug gradbeni poseg. To so objekti prometne infrastrukture (med katere spadajo tudi pregrade,



jezovi in drugi vodni objekti), cevovodi, komunikacijska omrežja, industrijski gradbeni objekti, športna igrišča in drugi gradbeni objekti.

### 3.3 Zakon o vodah

Z Zakonom o vodah [UL, RS, št. 67/02, 65/20] je zagotovljeno upravljanje z morjem, celinskimi in podzemnimi vodami ter vodnimi in priobalnimi zemljišči. To obsega varstvo okolja, urejanje voda in odločanje o rabi voda. S tem zakonom se ureja tudi javno dobro in javne službe, ki delujejo na področju voda, vodne objekte in naprave (člen 1).

Z ustreznim upravljanjem z vodnimi in priobalnimi zemljišči zagotavljamo dobro stanje vode in drugih, z vodami povezanih ekosistemov, zagotavljanje varstva pred škodljivim delovanjem voda, ohranjanje in uravnavanje vodnih količin in spodbujanje trajnostne rabe voda, ki omogoča različne vrste rabe voda ob upoštevanju dolgoročnega varstva razpoložljivih vodnih virov in njihove kakovosti (člen 2).

Vse posege v vode, vodna in priobalna zemljišča, zemljišča na ogroženih in varstvenih območjih ter gozdna, kmetijska in stavbna zemljišča morajo biti načrtovana in izvedena, da s svojim delovanjem ne slabšajo stanje voda, omogočajo varstvo pred škodljivim delovanjem, ohranjajo procese in ekosisteme (člen 5). Upravljanje z vodami in okolico je v pristojnosti države oziroma lokalne skupnosti, kjer je ta pristojna.

Vodno soglasje je potrebno tam, kjer se namerava zgraditi objekt ali napravo, ki bo služila za varstvo pred škodljivim delovanjem voda (člen 51). To so vsi posegi na vodnem in priobalnem zemljišču, na varstvenih in ogroženih območjih, ki bi s svojim delovanjem negativno vplivali na vodni režim ali stanje voda, tako trajno, kot začasno (člen 151a).

Varstvo pred škodljivim delovanjem voda, pomeni varstvo pred poplavami; površinsko, globinsko in bočno erozijo; erozijo morja; zemeljskimi in hribinskimi plazovi; delovanje snežnih plazov; ledom na celinskih vodah. To zajema tudi v primeru izrednega onesnaženja voda in zagotovljeni so ustrezni ukrepi za odstranjevanje negativnih posledic. Ukrepi varstva zajemajo gradnjo in upravljanje vodne infrastrukture, to zajema visokovodne nasipe, zadrževalnike, prodne pregrade, objekte za stabilizacijo tako dna kot brežin, črpališča in odvajanje zalednih voda (člen 82).

Vodna zemljišča s statusom naravno vodno javno dobro ne izpolnjujejo z zakonom predpisanih pogojev za vodno zemljišče. V kolikor zemljišče izgubi status naravno vodno javno dobro:

- razpolaga s tem zemljiščem zaradi poravnave zapadlih obveznosti do lastnika zemljišča, na katerem je že zgrajena ali se načrtuje gradnja vodne infrastrukture, ali zagotovitev nadomestnega zemljišča po Zakonu o vodah,
- zamenja to zemljišče za drugo, na katerem je zgrajena ali pa se namerava zgraditi vodna infrastruktura, ali zagotovi nadomestno zemljišče po Zakonu o vodah,
- zamenja to zemljišče za drugo vodno ali priobalno zemljišče, katerega ne upravlja direkcija.

V primeru, da je na zemljišču, na katerem je bila izdana odločba o prenehanju statusa naravnega vodnega javnega dobra, zgrajen objekt lokalne javne infrastrukture, vendar pa zemljiškoknjižno in katastrsko stanje še ni urejeno, ministerstvo ali lokalna skupnost predlaga, da se tako zemljišče prenese v last lokalne skupnosti na območju.

V kolikor pa z vodnimi zemljišči po prenehanju statusa naravnega vodnega javnega dobra ni mogoče ravnati, kot je navedeno v prejšnjem odstavku, veljajo naslednja določila:

- kmetijska zemljišča se prenesejo v upravljanje k upravljalcu s kmetijskimi zemljišči v državni lasti,
- s stavnimi zemljišči prosto razpolaga.

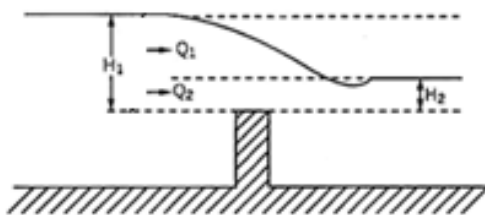
### **3.4 Zakon o varstvu okolja**

Z Zakonom o varstvu okolja [UL RS, št.39/06] se ureja varstvo življenjskega in z njih povezanega naravnega okolja ter splošne pogoje rabe naravnih dobrin, ki je temeljni pogoj za zdrav in okolje ohranjujoč razvoj. Delujemo v načelu trajnostnega razvoja, kar pomeni, da zadovoljujemo potrebe sedanje generacije, pri čemer zagotovimo naslednjim generacijam enake možnosti zadovoljevanja potreb. Z varovanjem okolja ohranjamo, izboljšamo in razvijamo celovitost, raznovrstnosti in kakovosti naravnih prvin, naravnih združb, naravnih dobrin in v njihovem okviru naravnih bogastev.

Kmetijska zemljišča, gozdovi, podzemni svet, kras, voda, morja in nerodovitni svet spadajo pod javno dobro, katere lastnina je država oziroma lokalna skupnost. Naravno javno dobro se uporablja le takrat, ko je zagotovljeno, da ni ogrožena njegova substanca in izključena njegova naravna vloga. Vsi vodni organizmi in rastline v odprtih vodah so lastnina države. Njihovo pridobivanje in uživanje na zemljiščih ne sme ogroziti njihove ekološke funkcije (člen 16).

## 4 VRSTE PREČNIH OBJEKTOV V STRUGAH VODOTOKOV

Za namen magistrske naloge so v nadaljevanju predstavljeni trije tipi prečnih objektov, ki jih največkrat zasledimo v vodotokih. To so jez, prag in drča. V zvezi s tem poznamo nekaj strokovnih izrazov, ki jih srečujemo v praksi. Preliv: kota krone preliva je vedno nad gladino spodnje vode; Jez (*Slika 1*): pred njim je vedno le miren tok in nastane zaježba; Prag: zanj je značilno, da je pred njim lahko mirni ali deroči tok; Talni prag: v primeru, da je spodnja gladina vode višja od krone praga; Stopnja: pojavi se kot stopnica v strugi vodotoka, torej gre za talni prag, gorvodno od praga pa se ne pojavi čelna stena, tako kot pri jezu [Steinman, 2010].

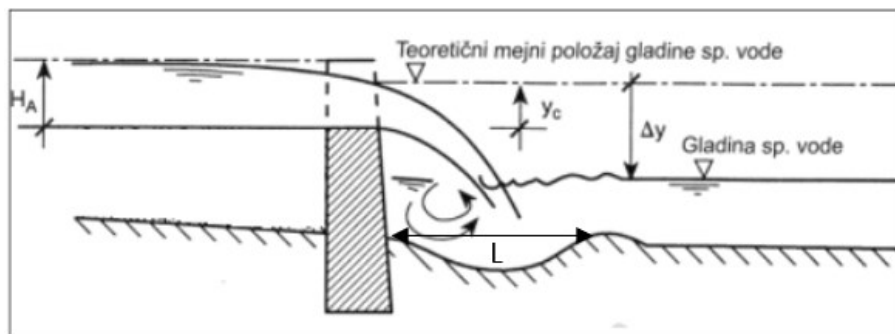


Slika 1: Primer prečnega objekta v strugi vodotoka in njegovega vpliva na gladinska stanja - jez (Reddy, 2021).  
*Figure 1: An example of a weir in a watercourse and its effect on the surface condition – a dam (Reddy, 2021).*

### 4.1 Jezovna zgradba

Jezovi so prečni objekti v strugi vodotoka, ki ustvarjajo razliko med gorvodno in dolvodno gladino vode v strugi. Ti objekti imajo po navadi vgrajene naprave za odvzem vode, prodne izpuste in imajo ustrezna zavarovanja dna struge ter brežin, predvsem na odseku dolvodno, kjer pride pojava vodnega skoka (podslapja). Manjše pregradne objekte lahko umestimo kot jezovno zgradbo in so največkrat uporabljeni prečni objekti, ki jih zasledimo v strugi vodotoka. Po ICOLD klasifikaciji je za jezovne zgradbe značilno, da je njihova višina med 2.5 in 15 metri ter vrednost  $H^2 \cdot \sqrt{V} < 200$  (<sup>2</sup>). Pri tem količina  $H$  predstavlja višino v metrih in sicer med rečnim dnom in najvišjo točko krone pregrade. Količina  $V$  pa predstavlja volumen zbiralnika, ki ga ustvarja pregrada (v milijonih  $m^3$ ) pri največji koristni akumulaciji [ICOLD, 2010]. Na samem objektu vodni tok doseže kritično globino in se nato prosto prelije preko objekta v obliki vodnega curka. V nekaterih primerih lahko teče tudi po hidravlično oblikovani zračni strani objekta. Veliko pozornost je treba nameniti podslapju oziroma erozijskemu tolmunu, ki se oblikuje pod pregradnim objektom, kjer pride do pretvorbe vodne energije, kar lahko povzroči erozijo. Na koncu podslapja je zgrajen še nekoliko manjši stabilizacijski (zaključni) prag, ki služi za zadrževanje in ohranjanje ustrezne višine spodnje gladine. V okoliščinah, kjer je zgrajeno podslapje z umirjevalnim bazenom in zaključnim pragom, se problem erozije prenese tik pod pregradnim objektom [Mikoš, 2007]. Največja razlika med visoko pregrado in prečnim objektom je ta, da prečni objekt ne služi zadrževanju velikih volumnov vode.

Pri pregradnih objektih je potrebno določiti lego spodnje vode (*Slika 2*), ki pa je odvisna od zmanjšane padca dna struge med posameznimi objekti, normalne pretočne globine in dolžine erozijskega tolmana  $L$ . V primeru, da je med pregradnimi objekti večji razmik od minimalne dolžine  $L$ , potem se lahko določi lego spodnje vode.

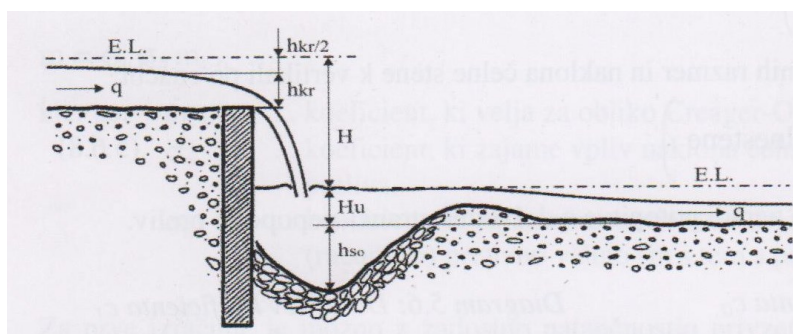


Slika 2: Določitev višine spodnje gladine (Horvat, 2010).

Figure 2: Determination of the height of the lower water (Horvat, 2010).

V hudournikih in gorskih vodotokih je zaradi specifičnosti pretočnih in spremljajočih erozijskih razmer treba pri načrtovanju posvetiti večjo pozornost. Pri računanju je potrebno upoštevati znatna nihanja vzdolžnega padca dna struge med posameznimi pregradnimi objekti. Ti izgubijo svoj pomen, v kolikor je razmerje med višino prelivanja na objektu in razmik med njimi manjše od območja nihanja padca. Pri tem lahko pride do istočasne nevarnosti nastanka erozijskega tolmana in erozije na predelu temeljenja pregradnega objekta. Na gorvodni strani pregradnega objekta preti nevarnost kot posledica nanosov s prodom, peskom, gruščem in drugih naplavin.

Dimenzioniranje temeljev pregradnega objekta je odvisna predvsem od željene globine erozijskega tolmana (Slika 3), pri čemer je potrebno predpostaviti ustrezen pretok voda, kakor tudi časovni razvoj tolmana pri kratkotrajni obremenitvi. Predvsem pomembno je, da razmislimo o možnosti spodjedanja zgornje brežine erozijskega tolmana pri nižjih visokih vodah.



Slika 3: Globina erozijskega tolmana (Steinman, 2010).

Figure 3: The depth of the erosion pool (Steinman, 2010).

Na različne načine lahko izvedemo statični izračun pregradnih objektov, in sicer večinoma jih obravnavamo kot težnostno pregrado, ob upoštevanju pritiskov (zemeljskega in vodnega) na gorvodni strani in vodnega pritiska na zračni strani, pri hudournikih se obravnava kot tristransko vpeto ploščo in kot ločno pregrado [Markič, 2018].

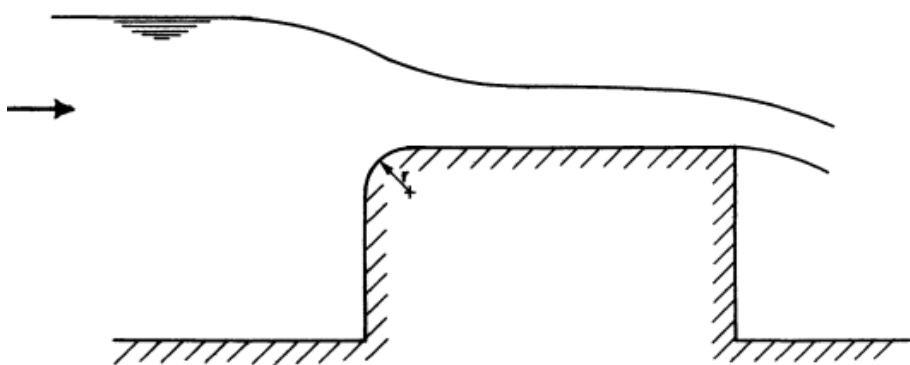
Kot že omenjeno moramo biti pazljivi pri urejanju hudournikov zaradi kompleksnosti primera. Previdni moramo biti glede izbire statičnega računa, upoštevati moramo možnost pojava drobirskih in blatnih tokov dolvodno od objekta, prelivno polje mora biti ustrezno večje, pri visokih vodah pa mora biti zagotovljen popoln preliv čez pregradni objekt.

## 4.2 Prag

Pragovi in drče so drugi najpogostejši prečni objekti, ki so vgrajeni v strugo vodotoka in predstavljajo zvezen prehod med pregradnimi objekti ter nizkimi pragovi. Največkrat jih vgrajujemo v spodnjem in srednjem toku vodotoka. Pragovi so vgrajeni na dnu struge in so vpeti v brežino struge vodotoka. Poznamo dve vrsti pragov, in sicer s stopnjami in brez stopenj. Stopnje so lahko izvedene kot togi gradbeni objekti (običajno gladke) ali kot nepovezane stopnje iz posameznih kamnitih blokov (hrapave). Pragovi morajo biti dimenzionirani na takšen način, da ne presegajo mejne hitrosti vodnega toka v vodotoku, kar bi pomenilo, da ne omogočajo obstanka rečnih organizmov. Pri večjih hitrosti začne voda odplavljati organizme, zato je največja možna hitrost, ki še omogoča življenje v vodi, enaka 3.5 m/s [Mikoš, 2007]. Pragovi so lahko izvedeni v kombinaciji kamna in lesa, v nekaterih primerih tudi kombinacija kamna ter betona [Mikoš, 2007].

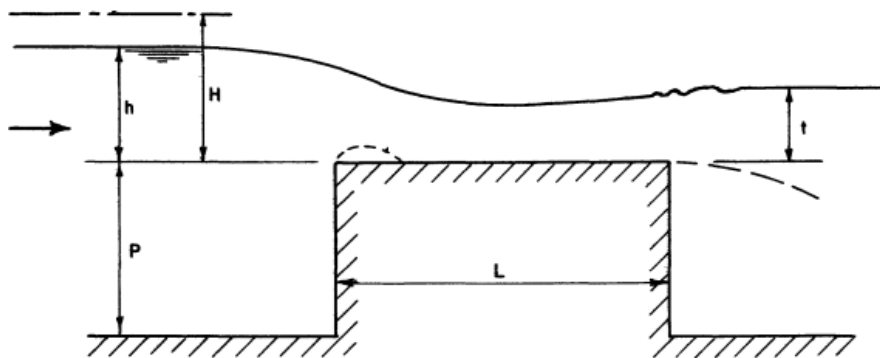
Nizki pragovi so pragovi brez stopenj. Njihova postavitev v strugo vodotoka pomeni utrditev dna struge z relativno nizkimi prečnimi objekti. Ti merijo v višino do nekaj 10 cm, ki so med seboj oddaljeni na relativno majhni razdalji. Samo v času nizkih pretokov je dosežen popoln preliv (Slika 4) z erozijskim tolmunom pod pragom in strugo z zmanjšanim padcem med nizkimi pragovi. Na sliki nižje (Slika 5) je prikazano prelivanje vode čez prag v času visokovodnega dogodka.

Tako kot pri pregradnih objektih, je tudi tu pomemben nastanek erozijskega tolmana, ki nastane pred objektom.



Slika 4: Popoln preliv čez prečni objekt (Tracy, 1957).

Figure 4: Free flow over a weir (Tracy, 1957).



Slika 5: Prelivanje v času visokovodnega dogodka (Tracy, 1957).

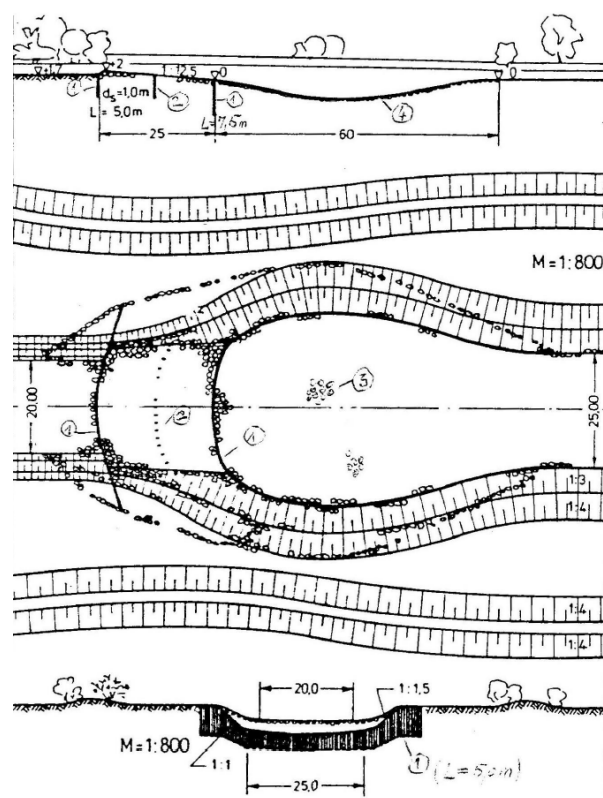
Figure 5: Submerged flow during a high-water event (Tracy, 1957).

### 4.3 Drča

Glede na namen drčo uvrščamo med stopenjske pragove z izrazitim blagim naklonom na zračni strani. Tudi pri dimenzioniranju drč se moramo posvetiti erozijskemu tolmunu. Zadnja vrsta kamnitih zložb pri drčah je podvržena velikim pritiskom, ki lahko zdrsnejo v tolmun in ogrozijo celoten objekt. Tako v splošnem velja, da je zadnja vrsta blokov jasno zajezena s spodnjo vodo, tako v času visokih kot nizkih vodah. V primeru da je erozijski tolmun, pri visokih vodah zelo dolg, se pri strmih padcih poveča prelivna višina na stopnji. Tudi pri nizkih pretokih se lahko poveča prelivna višina, kar povzroči preliv na zadnji vrsti blokov [Steinman, 2010]. To lahko sproži njihov zdrs v erozijski tolmun, da pa se temu pojavu izognemo je potrebno zadnjo vrsto utrditi s talnim pragom. Tukaj je običajno zelo pomembno, da je zadnja vrsta blokov podprta z železnimi traverzami ali zagatnicami oziroma lesenimi koli na spodnji strani. Te naj bi se vgrajevale tudi na določenih razdaljah gorvodno (Slika 6) [Kryžanowski, 2020].

Z načrtovalskega vidika so problematične predvsem zato, ker je hidravlična analiza izjemno kompleksna in tudi precej negotova. Drče je potrebno dimenzionirati tako, da je zagotovljen popoln preliv. V času visokih voda je pričakovati nepopoln preliv oziroma delno potopljeni preliv. Dimenzioniramo jih v srednjem in spodnjem odseku vodotoka in služijo za uravnavo višinskih razlik. Z drčo premagamo omejeno višinsko razliko, po nekaterih priporočilih med 2 in 3 metri. Pri večjih višinskih razlikah so le te težko obvladljive.

Z ekološkega in gradbenega vidika so bolj primerne stopnje iz kamnitih blokov, ker je njihova površina hrapava in tako omogočajo lažje prehajanje rib iz spodnje v zgornjo vodo. Pri gradnji stopenj iz kamnitih blokov se največkrat uporabljajo težki klesani bloki [Ferjančič, 2019].



Slika 6: Primer vgrajene zagatnice pri drči (Kryžanowski, 2020).  
Figure 6: An example of a build-in in a chute (Kryžanowski, 2020).

## 5 PODROBNEJŠI PREGLED VLOG PREČNIH OBJEKTOV

Prečni objekti so torej tehnični ukrepi v strugi vodotoka, katerega najpomembnejša funkcija je ta, da preprečuje prekomerno poglobljanje dna struge in stabilizirajo nivo leto struge. Prav tako zadržujejo plavje in plavine, razpršujejo vodne tokove, zagotavljajo stabilnost že nekoliko poškodovanim brežinam in zaustavljajo premeščanje plavin ob neurjih. Najprimernejše območje postavite prečnega objekta je na širokem delu struge, kjer so lokalna območja z mirnim tokom. Ta območja so ekološko najpomembnejša, saj tvorijo različne oblike dna strug ter brežin in zagotavljajo življenjske pogoje vodnim organizmom [Novak, 2007].

Za gradnjo prečnih objektov so uporabljeni različni materiali. Lahko se uporabi beton, zagatnice (služijo le za začasno uporabo), zidane konstrukcije, jeklene hidravlične zapornice, kamenje, gabioni ali les. Odločitev, kateri material bomo uporabili je odvisno od velikosti objekta, razpoložljivosti materiala, stabilnosti objekta in drugih projektnih pogojev [CIRIA, 2016].

Vzroki zaradi katerih postavljamo prečne objekte v strugo vodotoka oziroma jih obnavljamo so naslednji:

- poškodba nastala zaradi hidravličnih razmer, erozije ali dotrajanosti objektov,
- varnostni ukrepi glede nevarnosti tveganja, nesreče ali izognitve nesreče,
- spremembe glede tehničnih zahtev,
- slaba učinkovitost objekta,
- tehnološki napredki,
- sprememba namembnosti kot je izgradnja hidroelektrarne, rekreacijske površine ali namen izboljšanja okolja,
- in konec koncev tudi zaradi sprememb v zakonodaji.

### 5.1 Funkcija prečnih objektov

V nadaljevanju podajamo pregled najpomembnejših funkcij prečnih objektov, in sicer z njimi uravnavamo višino vode, vplivamo na pretočne hitrosti v strugi vodotoka, omogočajo stabilizacijo struge, predstavljena je funkcija prečnega objekta z okoljskega vidika, komercialna uporaba objektov in zagotavljanje varnosti.

#### 5.1.1 Uravnavanje višine vode

S prečnimi objekti reguliramo in določamo višino zgornje in spodnje vode. To je pomembno predvsem za plovnost vodotokov in dreniranje zemljišč ali kontroliranje visokovodnih dogodkov [Rickard, 2003].

Na območju Evrope so bile v preteklosti reke zelo pomembne z vidika plovnosti. Postavljeni so bili kanali, katerih namen je bil dvigovanje in spuščanje ladij med dvema različnima nivojema vode. Ti objekti so mogočne konstrukcije, do 100 m dolge in lahko dosežejo višinske razlike do treh metrov. V preteklosti se je za gradnjo takšnih objektov uporabljala kombinacija lesa in zidakov. V sedanjih časih pa se uporablja večinoma beton in jeklene zagatnice. V času gradnje takšnih objektov je potrebno zagotoviti ustrezno prehodnost za vodne organizme. Konstrukcije, namenjene za plovnost imajo

vgrajene pomične zapornice, katere pa morajo zagotavljati ustrezni natančnosti izvedenih del in prevajati ustrezen pretok čez samo konstrukcijo [Wan, 2019].

Klasični problemi pri tovrstnih objektih vključujejo poškodovane in dotrajane krone objektov, lokalno erozijo (kot posledica hidravličnih razmer), erozija za krilnimi stenami (služijo za varovanje brežin) in vzdrževanje ter popravilo dolvodnih odsekov. Vzdrževalna in obnovitvena dela na omenjenih objektih vključujejo [CIRIA, 2016]:

- popravilo in vzdrževanje krone objekta,
- povečanje pretočne sposobnosti s povečanjem dolžine krone stranskih nasipov in opornih zidov, pri čemer je omogočen preliv v pomožni kanal z enako pretočnostjo,
- zmanjšanje višinske razlike, med zgornjo in spodnjo vodo,
- kontroliranje erozije z uporabo zagatnic,
- zavarovanje dolvodnih objektov pred prekomerno erozijo.

S prečnimi objekti reguliramo tudi gladino vode v strugi vodotoka za namene dreniranja zemljišč ter poplavno varnost. Z njimi kontroliramo nivo vode v strugi vodotoka (kot tudi podtalnice), visokovodne konice so preusmerjene na poplavne ravnice, ki so temu namenjene ali zmanjšajo višino vode v strugi v času poplavnih dogodkov, s preusmeritvijo v pomožne kanale s čimer je zagotovljena večja pretočnost glavne struge vodotoka (primer: Grubarjev kanal v Ljubljani).

Hidravlične lastnosti prečnega objekta in njegovega preliva je odvisna od oblike objekta. Pri tem ločimo prečne objekte s fiksno koto krone in s spremenljivo koto krone [Steinman, 2010].

Objekti s fiksno krono (pregrade, jezovi, drče) so dimenzionirani tako, da prevajajo visoko vodo pod pogojem minimalnega nihanja vode (med zgornjo in spodnjo vodo). Medtem, ko je za objekte s spremenljivo koto krone značilno, da je gorvodno od objekta območje, ki služi kot zbiralnik vode za obdobje visokovodnih konic. Tako so pomični objekti v uporabi že dolgo let, ker so jih v preteklosti uporabljali za kontroliranje visoke vode. S pomičnimi zapornicami je mogoče kontroliranje količino vode v akumulaciji za določeno obdobje v letu. Tako je zagotovljena potrebna količina vode (za namene namakanja, pitne vode itd.) za poletne mesece in zadrževalnik vode v zimskih mesecih, ko nastopi obdobje visokovodnih konic. V Sloveniji se pomični jezovi večinoma uporabljajo za to, da se v času visokovodnih razmer poveča pretočni prerez. Na takšen način deluje večina hidroelektrarn na naših večjih rekah (na Soči, Savi, Dravi), prav tako pa tudi manjše zapornice, kot sta zapornici na Grubarjevem kanalu in na Ambroževem trgu, na reki Ljubljani.

Posebnost objektov s spremenljivo koto krone (z vgrajenimi zapornicami) je ta, da je obvezno merjenje zgornjih in spodnjih nivojev vode v strugi vodotoka. Objekti so lahko kontrolirani na samem kraju ali preko računalnikov v kontrolni sobi, pri čemer mora biti postavljena ustrezna oprema, ki to omogoča. V kolikor se uporabljajo kontrolne sobe, morajo le te biti ustrezno opremljene z zvočnimi in slikovnimi opozorili. Ti pa opozarjajo na delovanje ob odpiranju in zapiranju zapornic ter njihovo optimalno delovanje. Zapornice morajo biti kontrolirane (pri odpiranju in zapiranju) tako, da ne ustvarijo vodnega udara, ki bi lahko škodoval ljudem in okolju.

Upravljanje gorvodne in dolvodne višine vode tako pri fiksni kot pri pomičnih kronah kontroliramo s prelivanjem. Poznamo različne vrste prelivov čez objekt, ki jih lahko delimo glede na položaj osi preliva, konstrukcijo, vpliv spodnje vode, ozračje spodnje konture prelivnega curka, natočne stene preliva in geometrije prelivnega prečnega prereza.



Najpomembnejša in osnovna funkcija prečnega objekta je odvisna od hidravlične geometrije objekta (dolžina krone, nivo, oblika, konfiguracija objekta) in dolvodnih razmer. S tem je zagotovljena varnost gorvodne gladine vode. Dobro poznavanje hidrologije vodotoka je torej nujno potrebno za zagotavljanje različnim pretočnim razmeram, ki jih bo objekt moral prevajati. Višina, oblika, velikost in konfiguracija objekta so dimenzionirani tako, da je zagotovljeno vsem hidravličnim lastnostim in izpolnjen je končni cilj projekta. Hidravlično dimenzioniranje mora zmanjšati tveganje (na sprejemljivo raven), ki jih predstavljajo hidravlični pogoji na objekt, infrastrukturo, uporabnike in prebivalce. Odvisno od posameznega projekta bodo upoštevane naslednje zahteve, za zagotavljanje ustreznih hidravličnih razmer [CIRIA, 2016]:

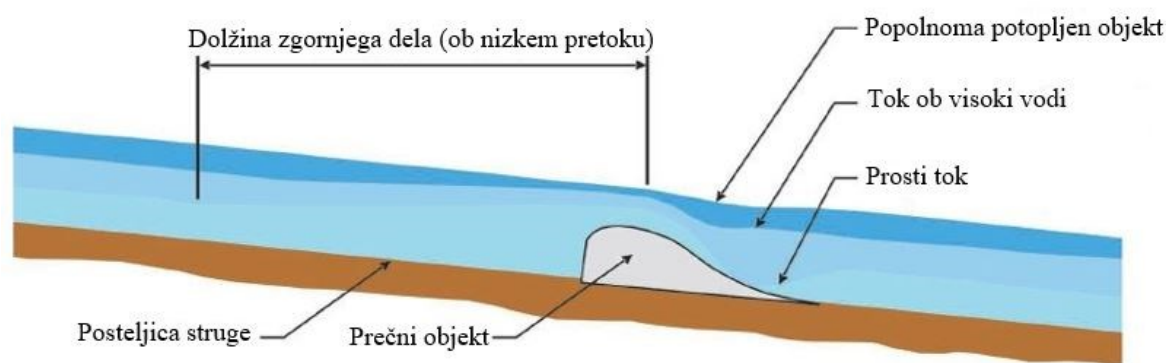
- hidrologija, pretočni pogoji in poplavne ravnice,
- določitev ustrezne hidravlične geometrije,
- ostale hidravlične značilnosti,
- hidravlično modeliranje,
- podslapje,
- erozija in zaščita pred erozijo,
- hidravlično dimenzioniranje za specifične objekte.

Potrebno je omeniti, da objekt nima vpliva le na bližnjo okolico, ampak njegov vpliv sega tudi višje gorvodno od objekta. Zvišanje gladine, pri enakem pretoku, povzroči znižanje povprečne pretočne hitrosti. To ima posledice tudi na zmožnost transporta sedimentov v strugi vodotoka. Počasnejše hitrosti imajo velik negativen vpliv na kakovost vode in vodne organizme. Po drugi strani, tudi dolvodno območje predstavlja problem, saj pride do lokalne turbulence in pretočna hitrost se poveča neposredno od objekta dolvodno. To lahko povzroči lokalno erozijo in negativne vplive na rečno strugo in brežino [Novak, 2007].

V kolikor se pretok čez objekt spremeni, se spremeni tudi gladina čez kruno objekta. Matematična povezava med gorvodnim nivojem in pretokom ostane veljavna, dokler je dolvodna gladina vode dovolj nizka, da nima vpliva na zgornjo vodo, to pomeni, da se tok prosto preliva preko objekta.

V kolikor je željeno doseči določene pretočne karakteristike, se lahko spremeni dolžina krone (poveča ali zmanjša) na podlagi prostora v strugi vodotoka. Kruna objekta se lahko poviša ali zniža, s tem dosežemo ustrezen pretok čez kruno, ali pa lahko spremenimo obliko krone objekta, pri čemer povečamo učinkovitost prevajanja pretoka čez objekt. S spreminjanjem teh karakteristik dosežemo ustrezen pretok oz. načrtovano prelivno višino.

Pri nižjih objektih lahko gladina vode naraste do točke, kjer se voda ne preliva več prosto čez kruno objekta in nastopi situacija, kjer ima spodnja voda vpliv na zgornjo. Lahko nastane tok čez prečni objekt v času visokovodnega dogodka ali pa je objekt popolnoma potopljen (*Slika 7*). V normalnih pogojih je pretok odvisen le od zgornje gladine, tako pa je v tem primeru odvisen od zgornje in spodnje vode.



Slika 7: Prelivanje čez prečni objekt, ob majhnem oz. visokovodnem dogodku (CIRIA, 2013).

Figure 7: Pouring over a weir, at a small and high-water event (CIRIA, 2013).

V splošnem je popolni (prosti) preliv, ki teče čez prečni objekt, opisan z naslednjo enačbo:

$$Q = C * B_z * h^{\frac{3}{2}} \quad [1]$$

$Q$  ... pretok [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],

$C$  ... koeficient pretoka, ki je odvisen od oblike krone prečnega objekta [/],

$B_z$  ... dolžina krone objekta [m],

$h$  ... višina čez kono objekta [m].

V nadaljevanju je predstavljena enačba preliwa za primer ostrorobega preliwa. Pretok  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] čez objekt je odvisen od širine preliwa, njegove višine  $H$  [m] nad kono preliwa, hitrosti čez preliv  $v$  [m/s] in gravitacijskega pospeška  $g$  [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]. Dotok ima določen energijski potencial, ki ga izračunamo kot prelivno višino z upoštevanjem hitrosti na objektu [Steinman, 2010]:

$$E = H + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad [2]$$

V kolikor računamo za količino pretoka čez pravokotni preliv uporabljamo naslednjo enačbo:

$$Q = \frac{2}{3} \mu * b \sqrt{2g} h_{pr}^{\frac{3}{2}} \quad [3]$$

$\mu$  ... pretočni koeficient preliwa [/],

$h_{pr}$  ... prelivna višina [m].

Nepopolni (potopljeni) preliv (Slika 8) nastane takrat, ko na prelivu ni dosežen prehod v deroči tok, ki je posledica dolvodnih razmer, ki vplivajo na preliv. Energija na dolvodnem odseku vpliva na razpoložljivo energijo prelivanja. Tako na gorvodni strani nastane manjša zajeza, ki prepreči popoln preliv čez objekt in s tem izničenje energije [Steinman, 2010].

Celoten pretok na takšnem objektu je sestavljen iz dveh delov (glej Slika 8):

- Popoln preliv, v delu, ki ni potopljen:  $h = z$

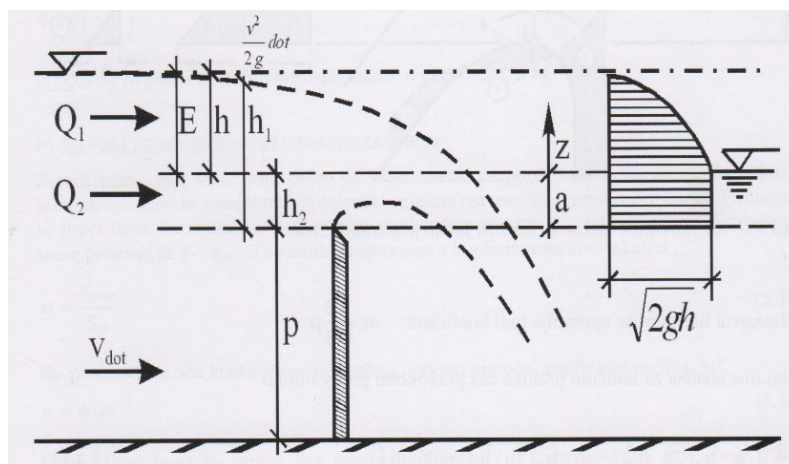
$$Q_1 = \frac{2}{3} \mu_1 b \sqrt{2g} z^{\frac{3}{2}} \quad [4]$$

- Iztok iz odprtine v tistem delu, za kolikor spodnja voda sega nad koto krono preliva:

$$Q_2 = \frac{2}{3} \mu_2 b \sqrt{2g} z^{\frac{3}{2}} \quad [5]$$

Torej je celotni pretok čez nepopoln preliv enak:

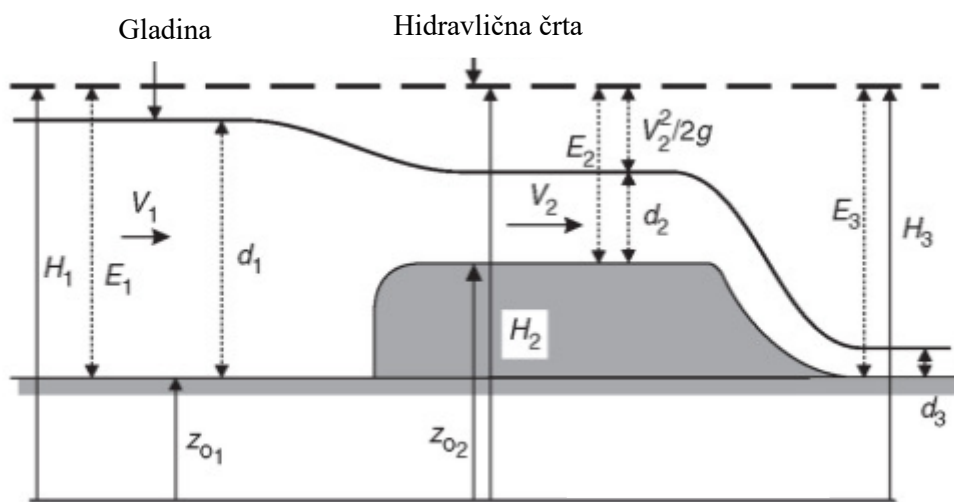
$$Q = \mu * b \sqrt{2g} \left\{ \frac{2}{3} z^{\frac{3}{2}} + a z^{\frac{1}{2}} \right\} \quad [6]$$



Slika 8: Nepopoln preliv (Steinman, 2010).  
Figure 8: Incomplete topping (Steinman, 2010).

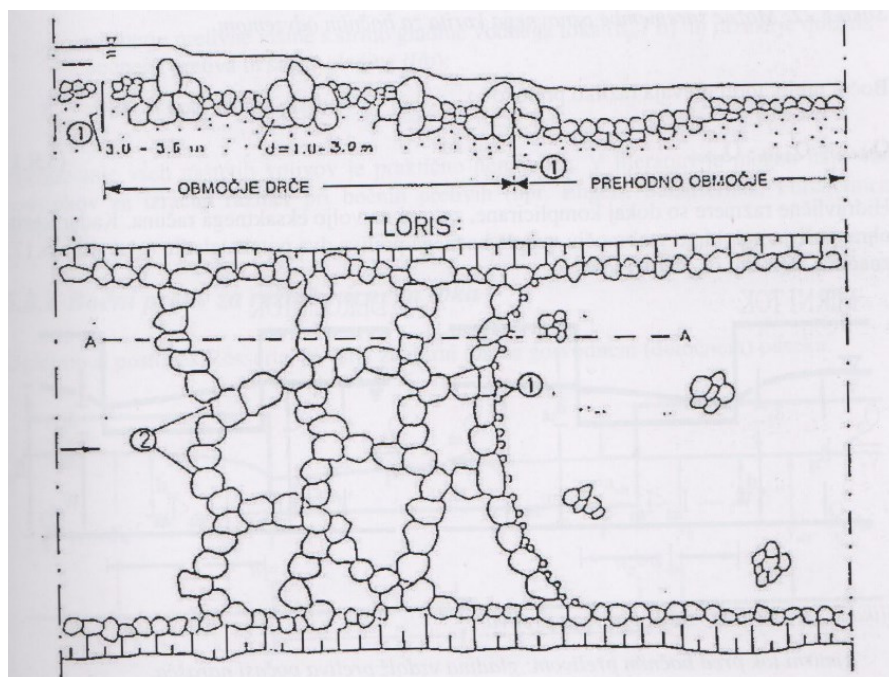
O širokem pragu (Slika 9) govorimo takrat, ko je dolžina praga takšna, da curek naleže na konstrukcijo. Pri tem so tokovnice vzporedno vzdolž praga. Dolžina širokega praga je odvisna od prelivne višine nad pragom  $h_p$ . Z naslednjim območjem je definiran široki prag:

$$0.67 \leq \frac{L}{h_p} \leq 10.0 \quad [7]$$



Slika 9: Prelivanje čez prečni objekt (Chanson, 2004).  
Figure 9: Spilling over a weir (Chanson, 2004).

Široki prag lahko povzroči ali pa ne povzroči zajezev toka. To določajo dolvodni robni pogoji, in sicer v primeru, da se na pragu ne pojavi prerez s kritično globino, kar pomeni, da ni prehoda v deroči tok. Nad pragom se pojavi le lokalno znižanje gladine in v tem primeru govorimo o širokem pragu, ki ne povzroči zajezev. V praksi se za takšne široke pragove uporablja izraz hrapave drče (Slika 10). Kot že samo ime pove, so hrapave in zaradi tega vso pot do spodnje vode izgublja energijo. Z vmesnimi tolmini pa omogoča nemoten prehod vodnim organizmom tako gorvodno kot tudi dolvodno.



Slika 10: Hrapava drča (Steinman, 2010).  
Figure 10: Rough stepped weir (Steinman, 2010).

### 5.1.2 Meritve pretokov

Ena najpomembnejših uporab prečnih objektov je za namen merjenja pretoka. Izmerjeni pretoki so potrebni za obratovalne namene, da opozarjajo in obveščajo o možnosti poplavljanja na predelih kjer je to možno ali izvajajo monitoring vode, ki je namenjena za odvzem pitne vode. Z večletnimi meritvami največjih pretokov v izbranem vodotoku, lahko določimo količine odvzema vode, ki je namenjena za pripravo pitne vode in določimo količino vode v obravnavanem porečju [Rickard, 2003]. Vsakoletne meritve pretokov se lahko uporabijo za napoved pogostosti visokih pretokov, poplav ter suš in monitoring za opazovanje dolgoročnega obnašanja vodotoka, kako se ta prilagaja na spremembe v okolju. Te spremembe so lahko povišanje površinskega odtoka ali prilagoditve na uporabo kmetijskih površin, vremenske spremembe in geologijo okolja. Meritve so pomembne tudi z vidika načrtovanja in gradnje objektov (mostov, prečnih objektov) v ali ob sami strugi vodotoka. Večina merilnih postaj tako omogoča spremljanje stalnega pretoka s pomočjo telemetrije v realnem času, ki se lahko uporabi in analizira za napovedovanje poplavnih dogodkov in opozarja na poplavne dogodke in s tem omogoča podajo informacij za kontroliranje drugih poplavnih objektov v času visokih dogodkov [Zhang, 2012].

Pretoki se merijo posredno in sicer na podlagi meritev vodne gladine, iz katerega se nato izračuna pretok. Ta izračun se lahko izvede na podlagi kalibracije višina-pretok na objektih ali na podlagi uporabe

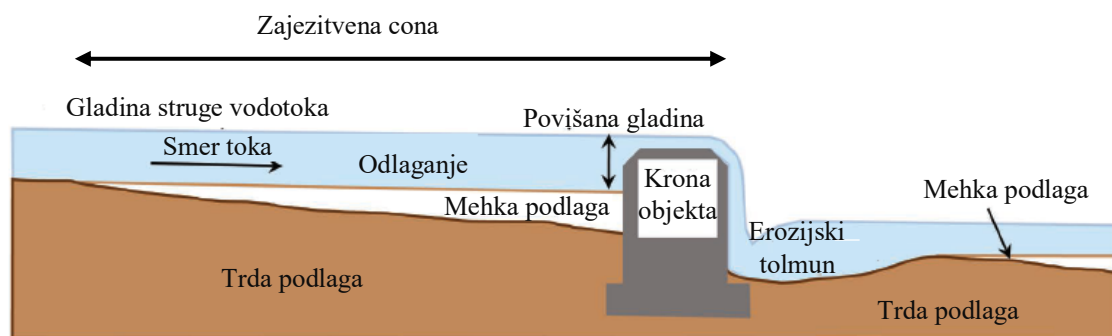
teoretične krivulje, ki je narejena na podlagi objekta standardnih dimenzij, in je rezultat predhodnih izkušenj in preizkusov na terenu ter v laboratoriju. Standardni merilni objekti omogočajo natančno merjenje pretokov v vodotoku brez potrebne predhodne kalibracije, so posebno dimenzionirani in usposobljeni glede na eksperimentalne preizkuse.

Za pridobitev realnih in kakovostnih meritev, je pomembno, da izvajamo meritve skozi celotno leto. To pomeni, da imamo meritve v času visokovodnih in nizkih konic, ki se uporabljajo za različne namene. Vendar pa to v večini primerov ni praktično. Nekaterе struge so bile dimenzionirane na nizke in srednje pretoke (za odvzem pitne vode), v primeru visokovodnih dogodkov pa je zgrajen pomožni kanal (ti. by-pass), ki omogoči odvajanje prevelike količine vode.

### 5.1.3 Hidromorfološki procesi in stabilizacija struge

Za boljše razumevanje hidromorfoloških vplivov objektov na vodotokih, moramo razumeti tipe rečne struge, vrste in procese, ki se v njej dogajajo. Geomorfologija, v vodotokih znana kot hidromorfologija, povezuje rečne oblike in procese s pretokom v strugi, prepoznavanje pomena erozije, transport in usedanje sedimentov v kombinaciji z rečnim režimom. Vodotoki so dinamični sistemi, ki se spreminjajo skozi prostor in čas na različne vplive, vključno s podnebnimi, geološkimi, uporabo zemlje in človeške aktivnosti. Z razumevanjem rečne morfologije lahko razumemo povezavo z rečnim habitatom in ekološkim odzivom na določeno stanje [East, 2018].

Prečni objekt vpliva na transportno sposobnost sedimenta vzdolž vodotoka (*Slika 11*). Na gorvodni strani objekta se sediment nalaga, zaradi tega se morfologija spremeni, kar predstavlja pomanjkanje življenjskega prostora za vodne organizme. Medtem pa na dolvodni strani objekta lahko pride do nekontrolirane erozije brežin in dna struge. Vpliv erozije je odvisno od tipa vodotoka (nižinski vodotok ali hudournik), njegove velikosti, lokacije in postavitve objekta, tip objekta in koliko časa je ta že prisoten v vodotoku. Kadar je potrebno upoštevati sedimentacijo, zaradi hidromorfoloških ali okoljskih razlogov, mora biti prečni objekt dimenzioniran tako, da omogoča transport sedimentov. S tem je zagotovljeno, da odvajamo kvalitetno vodo iz vodotoka in preventivno se izognemo možnosti zamašitve na črpalni točki odvzema [Major, 2017].



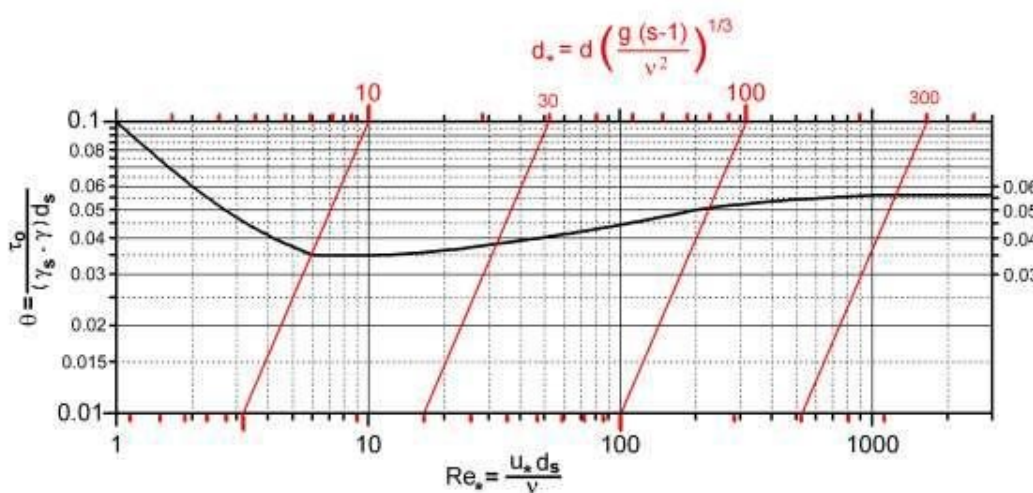
Slika 11: Vpliv prečnega objekta na hidromorfološke procese v strugi vodotoka (CIRIA, 2013).  
Figure 11: Impact of a weir on a hydro morphological processes in river hydraulics (CIRIA, 2013).

Pomembno vlogo v strugi vodotoka imata erozija in sedimentacija. Tokovi, ki nastanejo dolvodno od objekta so izrazito turbulentni in povzročijo erozijo dna in brežin struge dokler ne pride do zmanjšanja energije toka vode do te mere, da se sedimenti ne transportirajo več. Sipine in tolmini dolvodno od



objekta imajo veliko okoljsko vrednost, vendar pa morajo biti ustrezno zavarovani pred erozijo in zagotovljeno mora biti redno vzdrževanje struge vodotoka [Basson, 2009].

V tem koraku je pomembno tudi omeniti, da je iz hidravlike toka s prosto gladino in raziskav premeščanja plavin poznanih nekaj povezav s katerimi se skuša opisati povezavo med premeri zrn plavin in strižnimi napetostmi, ki jih na ostenje povzroča vodni tok. Zelo razširjen primer opisa tovrstne zveze je npr. Shieldsov diagram. Shieldsov diagram (Slika 12) prikazuje spremembo kritične brezdimenzijske strižne napetosti oz. Shieldsovega parametra ( $\Theta$ ) v odvisnosti od velikosti zrn plavin. Le-ta pa predstavlja mejo, s katero lahko ocenimo mejne/kritične premere plavin, ki bi se začeli pri določenih hidravličnih pogojih premeščati. Vrednosti Shieldsovega parametra nad mejno krivuljo pomenijo, da se plavine premeščajo, v kolikor pa se nahajamo pod krivuljo, se plavine ne premeščajo. Oznaka  $\tau$  predstavlja strižno napetost, ki je odvisna od premera zrn in hitrosti vodnega toka. V kolikor imamo opravka z večjimi premeri zrn, so za njihovo premeščanje potrebne večje strižne napetosti.



Slika 12: Shieldsov diagram (Miedema, 2010).

Figure 12: Shields diagram (Miedema, 2010).

#### 5.1.4 Uravnavanje odtočnih razmer v strugi

Podnebje v Sloveniji se spreminja skozi celotno leto, ob poletnih mesecih je padavin manj, medtem ko je v spomladnih in jesenskih mesecih padavin več. Prečni objekti morajo biti dimenzionirani tako, da zagotavljajo pretočnost ob vseh pogojih, se pravi ob normalnem pretoku, visokih in nizkih dogodkih ter ob ekstremnih dogodkih. Ena izmed vlog prečnih objektov je tudi ta, da zagotavljajo zadostno vodnatost strugi vodotoka ob sušnih mesecih. Ta pa je žal pogosto spregledana in večina objektov tega pogoja ne izpolnjuje. Ob tem si lahko pri hidravličnem dimenzioniranju tovrstnih objektov pomagamo s hidrološkimi in hidravličnimi modeli, ki jih potrebujemo za ugotavljanje razpona možnih pretokov in gladino spodnje vode pri dimenzioniranju prečnih objektov.

Za razliko od dimenzioniranja velikih pregrad pri načrtovanju prečnih objektov le-te običajno ne dimenzioniramo na izbrano povratno dobo. Vendar pa velja, da v kolikor je struga vodotoka dimenzionirana, da prevaja visoko vodo z npr. 100-letno povratno dobo, mora biti tudi prečni objekt projektiran, da prevaja isti pretok [CIRIA, 2016]. Voda se vedno preliva čez prečni objekt. Tok vode čez visoko pregrado teče preko preliva, ki je za to namenjen in ne čez samo pregrado [Hanania, 2020].

Izbrane karakteristike hidravlične prevodnosti objekta so odvisne predvsem od topografije prostora, kjer bo objekt umeščen v prostor.

Ob normalnih pretočnih pogojih, je vodostaj na gorvodni strani določena na podlagi obratovalnih pogojev. Kanali, ki služijo za premestitve rečnega prometa iz dveh različnih nivojev, dovoljujejo minimalne spremembe v vodni gladini, da dosežejo ustrezno globino (in se izognejo možnosti, da plovilo nasede). Pri dreniranju zemljišč mora biti nivo gladine vode v strugi pod nivojem drenažnega iztoka.

Normalno je, da so objekti, ki služijo za kontrolirano disipacijo energije vodnega toka del prečnih objektov, tako je torej zagotovljen prehod iz mirnega v deroči tok. Prehod iz enega na drugi režim se izvede preko hidravličnega skoka. Energija se v času prehoda razblini na samem objektu in ne sme biti prepeljana dolvodno, kar lahko povzroči škodo na mehkih brežinah ali spodjeda temelje prečnega objekta. Podslapja in erozijski tolmoni predstavljajo največje tveganje za poškodbo objekta, v smislu spodjedanja temeljev in brežin.

#### 5.1.4.1 Hidravlični vodni skok

Z vgradnjo prečnih objektov v strugo vodotoka torej zmanjšamo vzdolžni padec struge (in s tem hitrost toka), vendar pa ostane višek potencialne energije. Curek čez preliv najprej prehaja v deroči tok, ko se porabi dovolj odvečne energije, pa tok preide v ustrezni režim toka, ki ga narekujejo dolvodne razmere na izbranem odseku vodotoka. Ta prehod je izveden z vodnim skokom. V ta namen želimo v čim krajšem času doseči mirni tok. Z ustreznimi tehničnimi ukrepi je zagotovljeno, da je vodni skok in z njim disipacija energije dosežena čim bližje objektu. Razdalja in razpoložljiva energija vplivata na lokacijo in razdaljo, na kateri se pojavi vodni skok. Z ustreznim dimenzioniranjem dosežemo čim krajše in glede na lastnosti vodnega skoka še sprejemljivo podslapje. S koeficientom varnosti pa še dodatno zavarujemo izbrani odsek [Steinman, 2010].

Količina disipirane energije na prelivnem objektu, je odvisna od oblike samega objekta. Dodatne energijske izgube so na prelivu, kjer se tok najmanj odlepi od konstrukcije in je prisotno vrtnčenje, pri tem se zmanjša prelivna sposobnost objekta in poveča prelivna višina. Oblika vodnega skoka je odvisna samo od gibanja vode dolvodno od objekta. Z vidika disipacije energije vodnega toka, je najučinkovitejša disipacija energije dosežena pri popolnem vodnem skoku. Odgnani vodni skok pride v poštev, ko se v območju preliva ne izniči celotna energija.

V tem primeru je dno spodnje struge primerjalna ravnina. Specifična energija za slapom je  $E_2$ . Energijska razlika  $\Delta E = E_0 - E_2$  je torej tista energija, ki se izniči pri toku vode čez objekt (*Slika 13*).

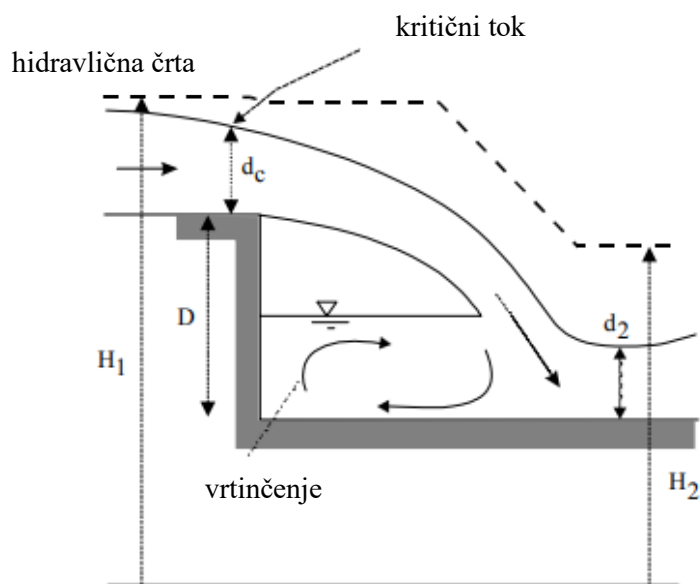
Porabljen energija se porabi na treh različnih delih in sicer: del energije  $\Delta_1 E$  se potroši pri pretoku čez pregrado do zoženega prereza, del  $\Delta_2 E$  se potroši na odbojnem delu vodnega skoka in del energije  $\Delta_3 E$  v samem vodnem skoku.

$$E_1 = \Delta_1 E + \Delta_2 E + \Delta_3 E = E_2 + \Delta E \quad [8]$$

$E_1$ ... specifična energija pred objektom,

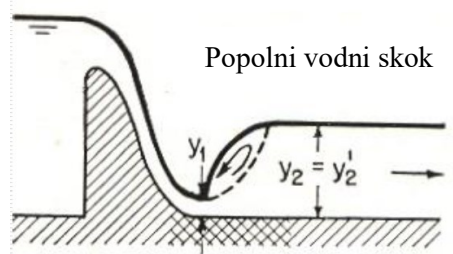
$\Delta E$ ... porabljen energija,

$E_2$ ... specifična energija za vodnim skokom.

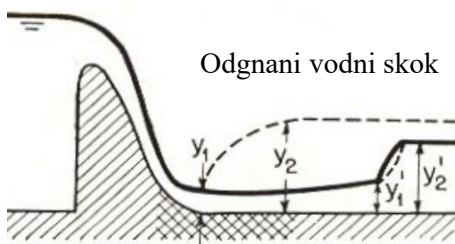


Slika 13: Izničevanje energije (Chanson, 1998).  
Figure 13: Energy dissipation (Chanson, 1998).

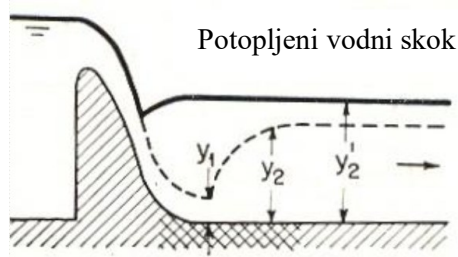
Z znanimi globinami toka, ločimo tri oblike vodnega skoka (Slika 14) in sicer odgnani, popolni in podrt vodni skok.



Kadar velja da je  $y_2$  enak globini spodnje vode, potem nastane popolni vodni skok – vodni skok se formira ob objektu.



Kadar velja da je  $y_2$  večji od globine spodnje vode, potem nastane odgnani vodni skok – vodni skok se formira dolvodno od objekta.



Kadar velja da je  $y_2$  manjši od globine spodnje vode, potem nastane potopljeni vodni skok – vodni skok se formira ob objektu.

Slika 14: Tipi vodnih skokov (Kryžanowski, 2021).  
Figure 14: Types of water jumps (Kryžanowski, 2021).



Tipi vodnega skoka so odvisni od brezdimenzijskega Froudovega števila. To je brezdimenzijska vrednost, ki opisuje različne režime toka v kanalu s prosto gladino. Froudovo število izraža odnos med kinetično in potencialno energijo toka. Enačba za določitev Froudovega števila se glasi:

$$F_r^2 = \frac{(v')^2}{gh'_c} \rightarrow F_r = \frac{v'}{\sqrt{gh'_c}} \quad [9]$$

$h'_c$ ... prva konjugirana višina [m]

$v'$ ... hitrost v konjugirani globini [m/s]

$g$ ... gravitacijski pospešek [m/s<sup>2</sup>]

V kolikor je Froudovo število manj od ena govorimo o mirnem toku, v kolikor meri več od ena se nahajamo v deročem toku.

Bolj ko je razvit vodni skok učinkovitejšo disipacijo energije dosežemo. Delež disipirane energije v odvisnosti od Froudovega števila dotekajočega curka deročega toka je naslednji [Steinman, 2010]:

$F_r = 1.0 - 1.7$  ni vodnega skoka,

$F_r = 1.7 - 2.5$  slaboten vodni skok (15% disipacija energije),

$F_r = 2.5 - 4.5$  oscilirajoči vodni skok (20% - 45% disipacija energije),

$F_r = 4.5 - 9.0$  stabilni, učinkovit vodni skok (45% - 75% disipacija energije).

#### 5.1.4.2 Podslapje

Prekomerne erozije se lahko izognemo tudi z postavitvijo podslapja na dolvodni strani objekta in s tem razbijemo višek vodne energije. Nekaj energije je priporočljivo, da se že razbije na prehodu med deročim in mirnim tokom na samem objektu. V tem primeru se izognemo prekomernemu spodjedanju temeljev objekta ali erodiranju brežine struge. Tudi odsek struge vodotoka, ki se nahaja gorvodno od objekta mora biti ustrezno zaščiten pred erozijo. To je doseženo z določitvijo ustrezne geometrije struge, hidravličnimi pogoji ter vrsto prečnega objekta.

S postavitvijo podslapja za prečnim objektom dosežemo zmanjšanje odvečne energije prelivnega curka. S povečanjem globine spodnje vode, ko poglobimo dno podslapja, omogočimo skrajšanje dolžine do nastopa popolnega skoka. Problem potopljenega vodnega skoka je sicer, da disipacije energije ni najbolj optimalna. S hidravličnim računom se določi ustrezno globino podslapja in dolžino skoka, ki določa dolžino objekta podslapja.

Podslapja so po navadi zgrajena iz betona ali zloženega kamenja, s čimer je zagotovljeno, da v primeru prekoračitve dopustnih obremenitev dna se ta ne erodirajo. Utrjeno ali poškodovano podslapje je smiselno nadomestiti z vodno blazino. To je velik tolmun, v katerem se izniči vodna energija, na enak način kot se to dogaja pod naravnimi slapovi. Debelina plošče podslapja, kjer se uporabi vodno blazino, je odvisna od globine prelivne vode in debeline vodne blazine. Globina podslapja brez vodne blazine pa je tako odvisna od globine prelivnega slapu vode in višine pregrade [Globevnik, 2014].

Spodaj je prikazan izračun podslapja povzet po Jevtiću (1978).



$q$ ... specifični pretok – izračuna kot  $Q/b$  ( $b$  je širina struge) [ $m^2/s$ ],

$\varphi \approx \varphi_1$ ... koeficient hitrosti [/],

$\Delta z_0 + h_0$ ... specifična energija vodotoka pred zidom v odnosu na dno struge za zidom:

$$(a_s - a_z) = (\sigma h_c'' - k) - (\Delta z_0 + h_0) \quad [15]$$

$$k = \frac{\alpha v^2}{2g} \quad [16]$$

Dolžina podslapja je odvisna od dolžine prelivnega curka, se pravi od dometa slapa ( $L_1$ ) in dolžine vodnega skoka v podslapju ( $L_2$ ). Račun je prikazan za masno točko v curku toka.

Domet vodnega curka v vodoravni smeri ( $L_1$ ) se izračuna s pomočjo naslednje enačbe, pri tem pa lahko zanemarimo majhno dotočno hitrost ( $u_0$ ).

$$L_1 = u \sqrt{\frac{2H}{g}} \quad [17]$$

kjer je:

$u$ ... hitrost prelivanja vode na pregradi [ $m/s$ ],

$H = H_0 + H_1$ ... višina padanja vodnega curka [ $m$ ].

V kolikor je poleg hitrosti prelivanja ( $u$ ) pomembna tudi velikost dotočne hitrosti ( $u_0$ ) potem je domet slapu določen z naslednjo enačbo:

$$L_1 = (u + u_0) \sqrt{\frac{2H_1}{g}} + H \quad [18]$$

kjer je  $u_0$  hitrost dotočne vode [ $m/s$ ].

Izračunana dolžina dometa slapu se meri od sprednjega lica praga. Izraz za dolžino praga je naslednji:

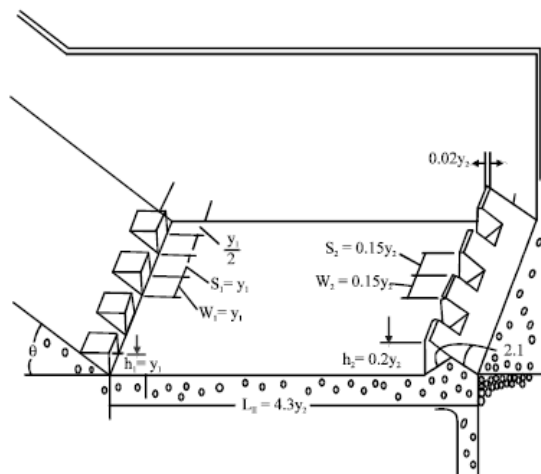
$$L_1 = 2\varphi \sqrt{hy_{max}} \quad [19]$$

kjer je  $y_{max}$  tlačna višina od gladine vode do težišča slapu.

Za ustrezno varnost podslapja dodamo dodatno dolžino 1.00 m. Tako končna dolžina ojačenega podslapja meri:

$$L = L_1 + 1.0 \quad [20]$$

Tako imenovani razbijači energije (*Slika 16*) so konstrukcije, ki so postavljene pod prečnimi objekti (oz. pregradami) in služijo, da se na njih izniči moč vode. Služijo kot dopolnitve podslapja in z njimi skrajšamo dolžino podslapja. Na objektu, se potencialna energija pretvori v kinetično energijo, ko voda potuje po objektu. Tok po objektu ima veliko moč in lahko povzroči velikansko škodo na objektu, kot tudi v strugi vodotoka [CIRIA, 2016].



Slika 16: Primer geometrije podslapja – USBR II (Padulano, 2017).  
Figure 16: Example of sub-waterfall geometry - USBR II (Padulano, 2017).

### 5.1.4.3 Tolmuni

Globina tolmana je v splošnem odvisna od pretočne količine in višine pregrade, preko katere pada voda in ustvari tolman pod pregrado. Izračun dejanske globine erozijskega tolmana je zelo težaven, saj naj vpliva veliko številnih dejavnikov (npr. zrnavostna sestava materiala, erodibilnostne lastnosti geološke podlage, dodatne deformacije podlage itd.), ki se lokalno lahko precej spreminja [Steinman, 2010]. Prav tako je pomembna tudi dotočna hitrost zgornje vode in globina spodnje vode.

Globina se običajno oceni na podlagi empiričnih enačb, katere so sestavljene na podlagi sledeče predpostavke:

$$T = \frac{w\Delta Hq}{d_m} \quad [21]$$

kjer je:

$T$ ... globina tolmana [m],

$\Delta H$ ... razlika med zgornjo in spodnjo vodo [m] (denivelacija nivojev),

$q$ ... pretok na enoto širine pragu [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],

$d_m$ ... premer merodajnega zrna plavin [mm],

$w$ ... proporcionalni koeficient [/].

Različni avtorji podajajo različne enačbe za izračun globine tolmana:

- Za ozračevane prelive je E. A. Schoklitsch (1930), na podlagi modelnih raziskav, predlagal naslednjo enačbo:

$$T = \frac{(4.57 * \Delta H^{0.2} * q^{0.57})}{d_m 90^{0.32}} \quad [22]$$

- Veronese (1937) je predlagal naslednjo enačbo:

$$q_t = \frac{3.68 \Delta H^{0.225} q^{0.54}}{d_m 90^{0.42}} \quad [23]$$

Navedeni enačbi ne upoštevata Froudovega števila, zato ni mogoče primerjati režima toka modelnih preiskav in stanja v naravi.

- Riedgar je podal, da naj bo globina tolmana  $T'$  določena na naslednji način (Tehničar 6, 1989):

energijska višina vode:

$$\text{zgoraj: } H_0 = H + \frac{v^2}{2g} \cong 0.05v^2 + h_0 \quad [24]$$

$$\text{spodaj: } H'_0 = \Delta H + \frac{v^2}{2g} \cong 0.05v^2 + \Delta H \quad [25]$$

Globina tolmana znaša torej (pri pogoju normalne gostote vode):

$$T' = v_0^2 + 2\Delta H = 0.10v_0^2 + 2\Delta H \quad [26]$$

V kolikor upoštevamo deformacijo:

$$T' = T - h \quad [27]$$

dobimo naslednjo enačbo:

$$yT = \frac{T' + 10y_0}{T' + 10T} = \frac{T'y_t}{3 - 2y_t} \quad [28]$$

kjer je:

$H_0$ ... globina na dolvodni strani struge s hitrostno višino [m],  
 $v$ ... hitrost dotoka vode [m/s],  $h$ ... globina vode v strugi [m],  
 $\Delta H$ ... razlika višin zgornje in spodnje vode [m],  
 $H'_0$ ... razlika višin zgornje in spodnje vode povečana s hitrostno višino [m],  
 $T$ ... globina tolmana [m],  
 $T'$ ... globina dna tolmana pri normalni gostoti vode  $y_w$  [m],  
 $y_0$ ... prostorska teža vode med prelivanjem, ki je pomešana z zrakom [kN/m<sup>3</sup>],  
 $y_t$ ... prostorninska teža vode na dnu tolmana [kN/m<sup>3</sup>].

- Wehrmann je predlagal, da naj bo globina tolmana določena po naslednji enačbi:

$$T = \frac{2(H+K)}{0.3y_w - \frac{K+H}{K+H+H_1}} = \frac{2H_0}{0.3y_w - \frac{2H_0}{H_0+H_1}} \quad [29]$$

kjer je:

$K$ ... hitrostna višina dotekajoče vode [m],  
 $H$ ... globina vode pred in za objektom [m],  
 $y_w$ ... teža vode [kN/m<sup>3</sup>],  
 $H_0$ ... skupna višina  $K+H$  [m] (od 0.5m do 0.8m meri potrebna zaščita temelja pod dnom tolmana in poglobitev tolmana  $T - h_1$ ).

### 5.1.5 Trdnost

Prečni objekti so izpostavljeni velikim obremenitvenim pritiskom, ki se tekom let spreminjajo in vplivajo na življenjsko dobo objekta. Največji pritiski, ki delujejo na objekt in vplivajo na trdnost so med drugimi tudi hidrostaticne in hidrodinamične sile (*Slika 17*). Izenačitevijo hidrostaticnih in hidrodinamičnih pritiskov je potrebno izvesti v času nizkih pretokov, ker so takrat največji. To pomeni, da je takrat na gorvodni strani objekta visoka gladina vode, na dolvodni strani pa je nizek nivo vode. Nasprotno sile in pritiski so lahko zmanjšani zaradi hidravličnih pritiskov. Pronicajoč tok pod pregrado ima dovolj velik hidravlični gradient in lahko povzroči prekomerno spodjedanje dna struge. To lahko povzroči prekomerno odnašanje sedimentov in spodjedanje temeljev objekta. Vzgonske sile na temelje objekta zmanjšajo možnosti zdrsa objekta, medtem ko nizki nivo spodnje vode zmanjša silo teže dolvodno na objekt ali podslapje [CIRIA, 2016].

Objekt mora biti dimenzioniran tako, da prenese vse pritiske, ki nanj silijo iz vseh strani. Objekt mora biti zasnovan tako da je omogočen odpor proti zdrsu, prevrnitvijo in zasukom objekta. Pričakovana konsolidacija terena mora biti zagotovljena v primernem časovnem obdobju. Neenakomerno posedanje terena lahko povzroči veliko nevšečnosti predvsem tam, kjer so vgrajene zapornice. Že z najmanjšimi spremembami v tleh lahko povzroči, da te ne delujejo (pri odpiranju in zapiranju) kot je zaželeno.

Lahko bi rekli, da so prečni objekti ledene gore na kopnem – večino objekta ne vidimo in je ali pod zemljo ali pod vodo. Večji del objekta torej ne vidimo in moramo biti pozorni na vsakršno koli spremembo na njem. V primeru manjših vzdrževalnih del mora ta optimalno delovati v vsakem primeru. Pri tem je tudi zagotovljena uporaba obnovljivih in trajnostnih materialov, ter vzdrževati sprejemljiv videz celotnega objekta.

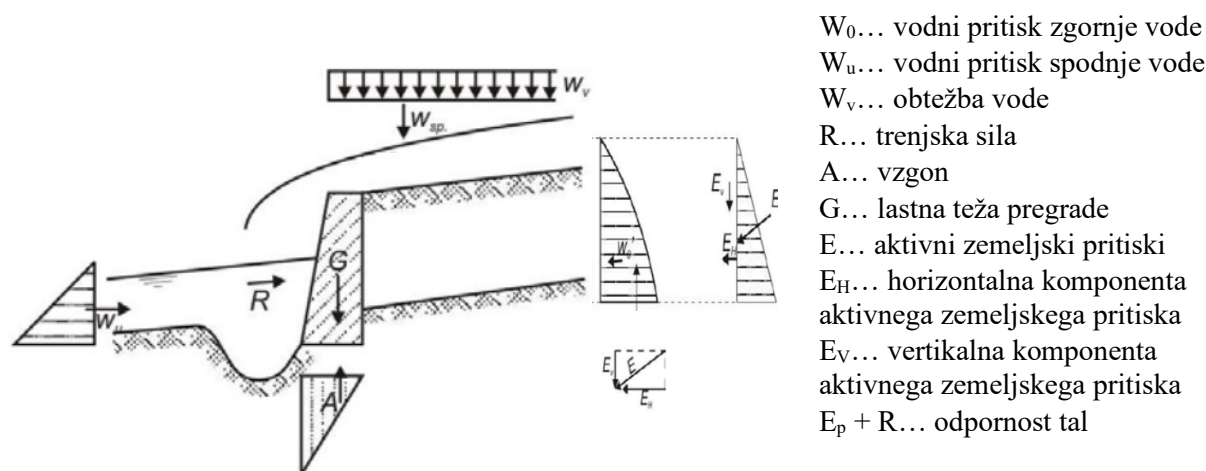
#### 5.1.5.1 Hidrostaticni tlak

Hidrostaticni tlak je tlak v mirujoči tekočini zaradi lastne teže. Hidrostaticni tlak in vzgon se pojavljata v porah tal, ki so zasičena z vodo. Velika količina vode v zemljini za zidom, povzroči povečanje rezultante sil na podporno konstrukcijo. Vodni tlaki delujejo na konstrukcije v primeru, ko te podpirajo (v primeru podpornih zidov) srednje ali nizke vodne prepustnosti. V kolikor ni poskrbljeno za dreniranje in izpuste se računa s tlakom vode za objektom, ki se ga upošteva skupaj z zemeljskim pritiskom. Pri izračunu zemeljskih pritiskov se upošteva prostorninska teža zemljine, ki je potopljena v vodo in ne prostorninsko teža naravno vlažne zemljine  $\gamma$ . Na prepustni zemljini upoštevamo zmanjšano prostorninsko težo, zaradi upoštevanja vzgona. Sila vodnega tlaka v mirujoči vodi je  $W = \gamma_w h A$ . Pri tekoči vodi s hitrostjo  $v$ , pa:  $W = \frac{mv^2}{2} = \gamma_w \frac{v^2}{2g}$ .

#### 5.1.5.2 Hidrodinamični tlak

Hidrodinamični tlak ima tudi vpliv vodnega toka, ki »udarja« ob prečni objekt, nastaja v porah tal, kjer je prisotna podtalnica, in je sorazmeren gradientu filtracijskega pretoka podtalnice v opazovani točki. Porni nadtlak nastaja v porah, ki so zasičene z vodo. Zaradi spremembe obtežbe tal nastaja, v stisljivih zemljinah, nadtlak, ki skupaj s hidrostaticno komponento sestavlja porni tlak v zasičenih zemljinah. V nezasičenih zemljinah se razlikujeta nadtlaka zraka v porah in vode. Zaradi stalne obtežbe na zemljino,

se porni nadtlak zmanjšuje, kot posledica iztiskanja vode iz por zemljine. Bolj ko je zemljina stisljiva, (majhna prepustnost) bolj intenzivno tam nastaja porni nadtlak.



Slika 17: Hidrostatične razporeditve sil na objekt (Markič, 2012).  
Figure 17: Hydrostatic distributions of forces on a weir (Markič, 2012).

### 5.1.6 Okoljski vidiki

Prečni objekti so umetno zgrajeni objekti, ki predstavljajo motnjo v smislu ekološke povezanosti vzdolž strug vodotokov. Po drugi strani pa lahko prečni objekti prispevajo k izboljšanju ekoloških razmer v strugi vodotoka in obvodnem prostoru, pri čemer ustvarijo možnost uravnavanja vlažnostnih razmer v tleh na območjih travnikov, močvirij in zavarovanih območij posebne ekološke vrednosti. Pri tem se dvigne rečna gladina, kar prepreči izsušitev dela struge, kontroliran izpust vode oz. preusmeritev toka vode v močvirja (občasna sušna območja struge lahko predstavljajo zatočišča nekaterim vrstam organizmom) [Rickard, 2003]. Z dvigom gladine v vodotoku, prečni objekti omogočajo možnosti za ustvarjanje mokrišč in ohranjajo habitate. S prečnimi objekti uravnavamo ustrezna gladinska stanja, s katerimi uravnavamo vlažnostne razmere v obvodnem prostoru. Pri umestitvi prečnega objekta v strugo vodotoka, za namen izboljšanja mokrišč, morajo le ti biti redno vzdrževani na prelivnih objektih. Mokrišča so namreč "živa", kjer voda ne samo zastaja, ampak tudi odteka in priteka sveža voda. Tako mora biti zagotovljeno nemoteno prelivanje, ker drugače prečni objekt ne služi svoji nalogi [EPA, 2009].

Poleg gradnje mostov, je bila druga najpomembnejša gradnja na vodotoku, prav gradnja prečnih objektov. Z njihovo postavitvijo je bilo zagotovljeno lepše prelivanje in izoblikovala se je povezava med vodotokom in pokrajino, predvsem tam kjer so bili parki in vrtovi. S postavitvijo kaskad v strugo vodotoka dosežemo bogatenje struge vodotoka s kisikom, s tem ko se voda preliva preko kaskad in se vrtinči. Pozitivni vidik prečnega objekta je ta, da preprečuje dolvodni transport sedimentov, vendar pa pri tem otežuje prehod rečnim organizmom gorvodno in dolvodno. Te omejitve lahko povzročijo zmanjšanje njihove reprodukcijske možnosti. Zgornji, počasni, zagrajeni del struge nad prečnim objektom ima uniformi habitat, z manjšo biodiverziteto od navadne struge vodotoka. To lahko predstavlja za nekatere vrste zatočišče, vendar pa po drugi strani idealen kraj za naselitev invazivnih organizmov. Po drugi strani zaježitvene vode vsebujejo manj kisika in večje koncentracije drugih raztopljenih plinov, ki jih zasledimo v stoječih vodah [CIRIA, 2016].

Z okoljskega vidika so pomembne tudi rekreacijske površine ter vpliv objektov na pokrajino. Za rekreacijske namene (kajakaše, kanuiste, raftarje) lahko visoki prečni objekti predstavljajo zahtevne in

nevarne pogoje za uporabo. Dolvodno od prečnega objekta se namreč pojavi vrtnčenje in brzice, kar v ekstremnih razmerah predstavlja tudi življenjsko nevarnost. Ob pravilnem dimenzioniranju prečnih objektov ter njihovem prelivanju se dolvodno za objekti oblikujejo obvladljivejši vrtinci in s tem zmanjšajo nevarnost [Seqwater, 2020].

V kolikor se namerava odsek vodotoka uporabljati tudi za rekreacijske namene, morajo odgovorne osebe zagotoviti ustrezno varnost prečnih objektov. V primeru da to ni zagotovljeno in se osebe ponesrečijo, lahko pride do kazenskega postopka zoper odgovorne osebe. V nekaterih okoliščinah se ti objekti lahko obnovijo in tako predstavljajo večjo varnost za uporabnike rekreacijskih površin. Pri načrtovanju in planiranju novih prečnih objektov je potrebno upoštevati potencialno izrabo okolice in vodnega objekta.

### 5.1.7 Ribje steze

Zaradi višinske razlike med zgornjo in spodnjo vodo prečni objekti otežujejo, v nekaterih primerih onemogočijo, prehod vodnim organizmom. To je tudi odvisno od posamezne ribje vrste in njihove zmožnosti premagovanja višinskih ovir ter gorvodne migracije. Za nekatere vrste rib je v njihovem naravnem ciklu, da skozi celo leto migrirajo, zato je potrebno določiti obdobje kdaj je dovoljena obnova ali rekonstrukcija prečnega objekta [Gardner, 2017].

Objekti morajo biti dimenzionirani tako, da omogočajo najlažji prehod in pri tem povzročijo minimalne nevarnosti posameznim ribam v času njihove migracije. Projektant mora upoštevati različne tehnične in biološke omejitve, ki si vezani na plavalno sposobnost in obnašanje različnih vrst rib, kakor tudi rečno hidrologijo, hidravliko in hidromorfološke kriterije. Glede na prečni objekt je lahko ribja steza dimenzionirana na dva različna načina. Lahko so obtočni kanali, kjer je izgrajen pomožni kanal. Druga možnost je, da so bolj tehnično zahtevne, odvisno od terena in vrste rib. V kolikor je ugotovljeno, da mora biti ribja steza prisotna v sami strugi vodotoka je potrebno razmisliti, kje bo ta postavljena. Določiti je treba zadosten pretok čez stezo, padec dna steze, omejiti pretočne hitrost znotraj sprejemljivih vrednosti, globina in mesta kjer lahko ribe počivajo [Magilligan, 2015]. Sedaj praktično ne moremo izgraditi novega prečnega objekta ali rekonstruirati obstoječega, če ne zagotovimo pogojev za prehajanje vodnih organizmov. S spremembo zakonodaje, je potrebno pri vsaki novogradnji ali rekonstrukciji objekta zagotoviti ustrezen prehod.

Prehodi za vodne organizme so narejeni na različne načine, odvisno za kakšen prečni objekt so namenjeni. Pred vsakim odvzemnim mestom (za namene hidroelektrarn ali pitne vode) se največkrat izgradijo rešetke. Katere in kakšne rešetke potrebujemo na odvzemnem mestu, je odvisno od namena odvzete vode in tipa opreme, ki jo uporabljamo. Rešetke služijo zadrževanju tako plavju kot vodnim organizmom, da ne potujejo skozi cevovod, pri čemer pride do možnosti poškodbe opreme ali organizmov. Ribje rešetke morajo biti primerne velikosti, da je ribam preprečen vstop skozi njih. Pri tem je potrebno omeniti, da imajo rešetke povsem drugo funkcijo kot prečni objekti [CIRIA, 2016].



### 5.1.8 Komercialne namene

Prečni objekti se lahko uporabljajo tudi za komercialne namene, kot za odvzem vode za industrijsko rabo ali hidroenergijo. V teh primerih pride v poštev gradnja večjih prečnih objektov, kot so pregrade in jezovi, ki pa niso obravnavani v tem magistrskem delu. Za namene pitne vode, mora imeti vtočni objekt dovolj velik hidravlični padec, po katerem voda odteče po cevovodu ali kanalu.

Pri dimenzioniranju odvzemne vode je pomembno, da zagotovimo minimalni ekološki pretok, ki je nujno potreben za vodne organizme. Pri tem je treba upoštevati, da odvzemni objekt deluje v obdobju nizkega in visokega pretoka, prav tako pa tudi v času ko je pretok spremenljiv. Z zakonodajnega vidika je tukaj ključna ocena tako imenovanega ekološko sprejemljivega pretoka Qes. Ekološko sprejemljivi pretok je pretok, ki je odvisen od ekološkega tipa vodotoka in od srednje malega pretoka. Z njim dosežemo dobro stanje voda v skladu z Vodno direktivo [Urbančič, 2015].

### 5.1.9 Zagotavljanje varnosti

V tem poglavju so predstavljene nevarnosti zaradi uporabe/dostopa do objekta s strani prebivalstva, nevarnosti kot posledica neugodnih stabilizacijskih razmer in nevarnosti zaradi izjemnih dogodkov. Pri tem je poudarek na obratovalni varnosti prečnih objektov, potencialnih nevarnosti, ki lahko nastanejo zaradi objektov in njihove potencialne porušitve, metode ocene tveganja in na kakšen način povečamo varnost pri dimenzioniranju takšnih objektov.

*Nevarnost zaradi uporabe/dostopa objekta s strani splošnega prebivalstva.*

Nevarnost tveganja za nesrečo mora biti izvedena ob samem objektu, pri tem so določi obseg možnih nevarnosti, verjetnost za nezgodo in načrt reševanja, v kolikor je to potrebno. V kolikor gre za nevarnejši objekt oziroma je njegova postavitev na neugodnih tleh, mora biti ta ocena izvedena večkrat. Skozi čas se varnost objekta spremeni zato ta potrebuje ustrezno obnovo, v resnejših okoliščinah popolno prenovo.

V kolikor je nevarnost zelo velika in nesprejemljiva mora biti ta eliminirala ali zmanjšana do mere, da je še sprejemljivo. V primeru, ko to ni mogoče izvesti, mora biti kraj nevarnega objekta ustrezno zavarovan na način, da je ljudem preprečen vstop na samo območje. Resnost nesreče in tveganje je odvisno od preliva čez objekt in na razmerje med gladino spodnje vode in višino hidravličnega skoka [CIRIA, 2016].

Ocena tveganja mora biti izvedena tako, da prikaže nevarnosti na objektu, nevarnost, ki lahko preži na okoliške prebivalce in verjetnost tega, ter na kakšen način jim lahko priskočimo na pomoč v primeru, da jo potrebujejo. Ocena mora biti izvedena dovolj pogosto, da se ugotovi resnost potencialnega incidenta ali nesreče. Z redno oceno tveganja je ugotovljena kakršnakoli sprememba na objektu ali njegovi okolici. Pred samim dimenzioniranjem objekta, njegovo obnovo, obratovanjem ali odstranitvijo, je potrebno presoditi vsakršno tveganje.

*Nevarnost, kot posledica neugodnih stabilizacijskih razmer.*

V kolikor pride do porušitve objekta ali kakršne koli druge nepravilnosti v samem objektu, lahko v strugi vodotoka pride do hidravličnih, fizičnih, kemičnih ali bioloških sprememb. Največje tveganje predstavlja predvsem hidravlična sprememba v strugi, kot posledica tvorbe vodnega skoka. Pri tem se

namreč tokovi pod objektom vrtnčijo, kar predstavlja veliko nevarnost za plovnost plovila in osebe. Oseba ali plovilo v vodotoku, izgubita nadzor, se potopita pod gladino in nato vrneta na površje, kjer sledi ponoven potop pod gladino. To s časoma privede do izčrpanja osebe in v skrajnih primerih utionitve. Zmanjšana sila vzgona onemogoči ohranjanje ponesrečenca nad gladino [CIRIA, 2016].

Nevarnosti, ki so posledica hidravličnih razmer so odvisne od pretoka in višine dolvodne gladine vode. Posebno moramo paziti na objekt, ki ne kaže nevarnosti v času nizkih pretokov, lahko pa povzroči veliko tveganje v času visokovodnih konic. Objekti, ki imajo strm ali vertikalni padec in tisti z nespremenljivim hidravličnim padcem, so praktično bolj tvegani, ker težje kontroliramo njihovo prelivanje, kot pa hidravlično ugodnejši objekti.

#### *Nevarnosti zaradi izjemnih dogodkov, kot je porušitev.*

Še ena nevarnost, ki preži na objekt je nenadna porušitev prečnega objekta, kar povzroči nenadno prelivanje velike količine vode in dolvodnega poplavljanja. Porušitev objekta predstavlja nevarnost predvsem za ljudi, kar je povezano s hitrostjo poplavljanja, višino gladine in hitrostjo vode, odneseni porušeni material zastaja dolvodno in povzroči še večje zastajanje vode in s tem poplavljanje. Enak problem nastane pri objektih, kjer se uporabljajo zapornice. V nekaterih primerih lahko nepravilno delovanje hidrotehnične opreme (zapornic) povzroči še večjo škodo, ker lahko pride do nenadne spremembe pretoka.

## 6 SANACIJA PREČNIH OBJEKTOV

### 6.1 Obnova prečnih objektov

V primerih, ko prečni objekti ne služijo več svoji funkciji ali pa je ta spremenjena in ne služijo več svojim namenom, je potrebno objekt sanirati. Potreba po sanaciji in obnovitvi prečnih objektov je odvisna od trenutnega stanja in učinkovitosti objekta. Eden izmed kriterijev za sanacijo prečnih objektov je tudi nevarnost porušitve poškodovanega objekta. Prav tako je odvisno od trenutne zakonodaje, finančne situacije in ostalih del, ki se izvajajo v bližini [CIRIA, 2016].

Z naslednjim konkretnim primerom je predstavljeno, kdaj je potreba po obnovi prečnega objekta. Ali obstoječi objekt deluje učinkovito, ima sprejemljive vplive in obstaja možnost nevarnosti? Možne rešitve so lahko naslednje:

- V primeru, da je odgovor da, potem ni potrebe po sanaciji objekta.
- Objekt se lahko odstrani, delno odstrani ali pa je potrebna izgradnja pomožnega kanala.
- Prenova, popravilo ali izboljšava objekta.
- Zamenjati z alternativo.

Definirati je potrebno potencialne vplive, prednosti, težave in možnosti pri začasni in trajni okolici. To se nanaša na varnost, okolje ali hidromorfologijo, prav tako ima lahko velike vplive na hidravlične razmere, poplavno ogroženost, hidroenergijo ali uporabo drugih obnovljivih virov energije. To ima lahko nadaljnji vpliv glede na možnost dostopa do objekta, nivo podzemne vode, tip vodotoka, sprememba toka, nevarnost poplavljanja, velikost sedimentov v strugi vodotoka in možnost onesnaženja [Kitchen, 2016]. Prav tako je potrebno upoštevati okoljske omejitve, kot so varovana območja, naravne vrednote, zavarovana območja in Natura 2000.

Vplivi so dolgoročni ali kratkoročni, začasni ali trajni in so odvisni od veliko različnih faktorjev, tudi od tipa vodotoka (hudournik, potok, reka), lokacije objekta, velikost prečnega objekta in ostalih lokalnih posebnosti okoli objekta in njegove okolice. Z nekaterimi vplivi in posegi v okolje moramo ravnati pazljivo, da ne povzročijo prekomerne negativne vplive na okolje, medtem, ko z drugimi vplivi omogočimo izboljšavo okolja in prostora.

### 6.2 Možne sanacije

V kolikor je ugotovljeno, da je objekt potreben obnove, se projektant odloči, ali je objekt potreben obnove, izboljšave, ali pa bo zamenjan z alternativno rešitvijo.

Sanacijske možnosti za obstoječe objekte: popolna odstranitev, znižanje objekta, njegova prenova, popravilo, izboljšava ali zamenjava, v skrajnih primerih je dovoljeno pustiti objekt takšen kot je. Ta možnost je sprejemljiva le v primerih, ko njegovo popravilo ni varno. V nekaterih primerih je premišljeno postaviti povsem nov objekt. Kakršnakoli rešitev in prenova je odvisna od trenutne zakonodaje, inženirskih možnosti, okoljskih in hidromorfoloških karakteristik, naravne dediščine ter ostalih faktorjev, ki vplivajo na sam objekt posredno ali neposredno [CIRIA, 2016].

Torej, v kolikor je ugotovljeno, da obstoječi prečni objekt ne opravlja svoje naloge, je možno, da se ga odstrani, zniža, izboljša ali izgradi pomožno strugo, ki služi za kontrolirano odvodnjo. Ukrepi

zagotavljajo izboljšanje okoljskih razmer ali zmanjšanje negativnih posledic. V kolikor se odločimo, da bomo objekt porušili v celoti, je priporočeno, da to naredimo kontrolirano. Ni zaželeno, da se objekt poruši zaradi naravne dotrajanosti. S tem lahko povzročimo nekontrolirano premeščanje sedimentov odloženih za prečnimi objekti dolvodno, kateri so lahko onesnaženi in lahko predstavlja tveganost rečnim organizmom. S kontrolirano porušitvijo objekta se izognemo poplavam, onesnaženjem in zavarujemo druge dolvodne objekte.

V kolikor je prečni objekt namenjen za odvzem pitne vode ali za izvajanje kontrole kakovosti vode, potreben izboljšave, ga moramo temu primerno obnoviti in sanirati. S tem je zagotovljeno nemoteno delovanje z minimalnim negativnim vplivom na okolje in varnost. To vključuje vgradnjo ribjih stez, sprememba krone preliva z namenom boljšega prelivanja ali dodati razbremenilnike pretoka, s katerimi zmanjšamo negativne učinke in zmanjšamo poškodbe.

Neglede na to, kakšen pristop je izbran, moramo biti pozorni na naravne procese v vodotoku in zagotavljati funkcijo prečnih objektov, ne da bi pri tem ogrožali druge interese. Izbrana možnost mora biti prilagodljiva na vsakršno koli spremembo, ki lahko nastane med projektiranjem objekta, kot je sprememba odtočnega režima kot posledic nepričakovanih podnebnih sprememb, namembnost zemljišča ali izraba zemlje.

Pri nas je eden pomembnih kriterijev za izvedbo sanacijskih del v obdobju, ko je to za vodne organizme najmanj moteče (npr. ko se ribe ne drstijo). Kakršnakoli sanacijska ali vzdrževalna dela v vodotokih v smislu urejanja pretočnosti in prodnosti neizbežno povzročijo tudi določene spremembe v hidromorfologiji struge. Ribiči opozarjajo, da se zaradi sprememb v geometriji prečnega prereza struge spremeni sestava plavin, fizikalno – kemijskih in biotskih lastnosti vode, kar negativno vpliva na vodne organizme. V primeru intervencijskih ukrepov pa morajo biti sanacijski ukrepi izvedeni v najkrajšem možnem času, ne glede na obdobje. Intervencijski ukrepi so ukrepi, ki jih moramo izvesti v najkrajšem možnem času in predstavljajo nevarnost za vodotok ter rečnega in obrečnega življenja, kot posledica visokovodnih dogodkov. V kolikor ni zagotovljena prehodnost vodotokov za ribe lahko pride do tako imenovane genetske izolacije populacij znotraj posameznih odsekov vodotoka, kar ni dobro za reprodukcijo rib [Zabrc in sod., 2010].

Zadrževalniki pred pregradnimi objekti (predvsem manjšimi in starejši) so velikokrat zapolnjeni s sedimenti, kateri zmanjšajo kapaciteto zadrževanja vode, poslabšajo strukturo objekta in povečajo možnost dolvodne erozije, kar povzroči drago vzdrževanje in nevarnost. Na takšen način letno izgubimo med 0,5 in 1 % globalne kapacitete zadrževanja zaradi nalaganja sedimentov [Basson, 2009].

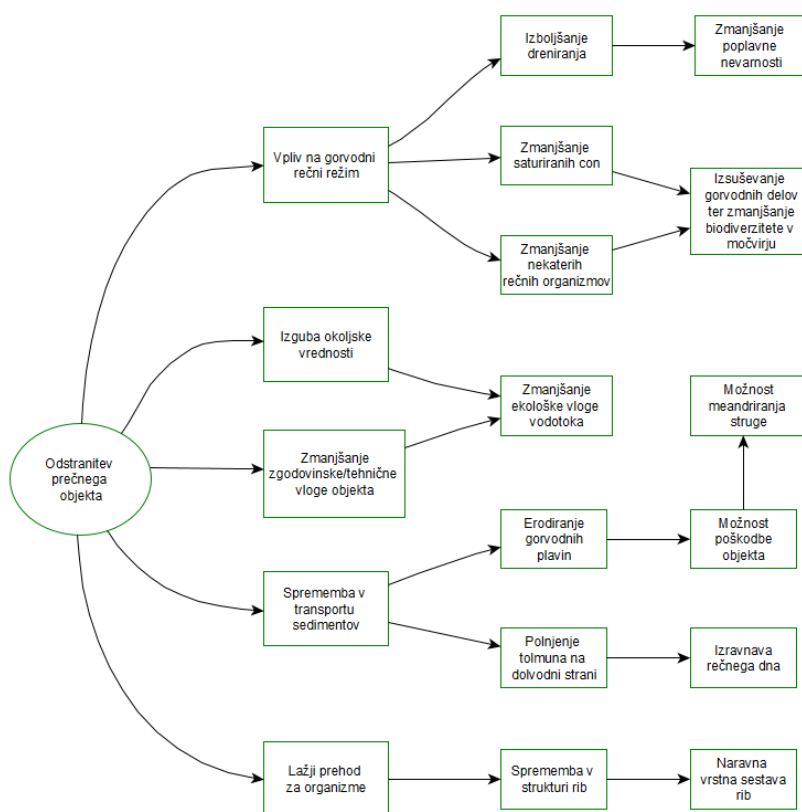
Kar nekaj objektov je že starih, zato bi bila priporočljiva njihova odstranitev iz struge, ob tem pa je treba upoštevati spremljajoče procese, ki se lahko pojavijo zaradi odstranitve tovrstnih objektov, zaradi okoljskih, ekonomskih in varnostnih razlogov. Veliko jih je bilo odstranjenih, ker niso več služili svojim namenom, ali ne zagotavljajo ustreznih okoljskih in varnostnih pravil. Največ jih odstranjujemo zaradi ekoloških vplivov, pri tem pa je potrebno določiti potencialne vplive na hidromorfološke razmere v strugi.

### 6.2.1 Odstranitev ali znižanje

V kolikor objekt ne služi več svojemu namenu, ali pa je njegovo vzdrževanje drago, lahko le tega odstranimo iz struge vodotoka. S tem ukrepom zagotovimo ponovno zveznost v strugi vodotoka. Odstranitev nefunkcionalnih ali močno poškodovanih objektov je generalno gledano pozitivno v smislu

varnosti in zdravja za ljudi, prehodnosti za ribe, hidromorfoloških posebnosti, izboljšanje habitata, povezanost in naravnih procesov v strugi vodotoka. Odziv vodotoka na odstranitev prečnega objekta je zelo odvisen od lokalnih razmer in spremenljivosti. Pri tem mora biti izvedena ocena vplivov na odstranjeni objekt, ki pa mora biti izveden pod nadzorom vodarjev ali hidrotehničnih inženirjev. Ocena mora zajemati tudi odzive gorvodno in dolvodno od objekta in glede spremembe z vidika dolgoročnih vplivov. To je zato, ker bo vodotok drugače reagiral na odstranitev objekta čez čas, na drugačen način odvisno od tipa vodotoka in odvisno od aktivnosti na njem [Elbourne, 2013]. Tukaj je potrebno omeniti verjetnost pojava ekstremnih dogodkov, npr. precej časa lahko preteče do poplavnega dogodka v katerem se pokaže problem zaradi odstranitve prečnega objekta. V Evropi in drugod po svetu, se podpira ideja da so reke čim bolj sonaravno urejene, s tem je dosežena večja dinamičnost reke in tako povezujejo širše okolje habitata ter biodiverziteto. Vendar pa pomen vzpostavitve nove struge vodotoka, predstavlja več kot le odstraniti nekaj objektov in preprek v strugi. Vodotoki so regulirani že od nekdaj, zato nekateri objekti predstavljajo tudi zgodovinsko vrednost, predvsem tehnično dediščino. Na drugi strani pa so vodotoki, na katerih bi odstranitev takšnega objekta prineslo veliko pozitivnih vrednosti. Pomembno je, da so odločitve odvisne od razumevanja hidromorfoloških razmer vodotoka.

Pri presoji ali je objekt nekje potreben ali ga lahko odstranimo, se nam poraja prvo vprašanje: Kakšna je njegova osnovna funkcija? V kolikor ne služi več za varovanje pred visokimi vodami ali preprečitev prekomerne erozije gorvodno in njegov obstoj ni mogoče ugotoviti in je nesmiseln, je potem v naslednjem koraku primerno, da se takšen objekt odstrani. V drugem koraku je potrebno ugotoviti, ali se objekt v celoti odstrani iz vodotoka ali je dovolj, če ga le nekoliko znižamo. Znižanje objekta je po navadi lažje in cenejše. V primeru, da obstaja tveganje, da se po odstranitvi objekta struga vodotoka zelo spremeni, potem je bolje da se v vodotok postavi stabilizacijske stopnje ali pragove, ki ta pojav zavirajo [Rickard, 2003]. *Slika 18* prikazuje možne vplive tako na vodotok kot njegovo neposredno okolico, po odstranitvi objekta iz struge vodotoka.



Slika 18: Primer možnih vplivov, ki nastanejo po odstranitvi prečnega objekta iz vodotoka (Rickard, 2003).

Figure 18: Examples of impacts that may result from the removal of a weir (Rickard, 2003).

Višji prečni objekti (pregrade) služijo tudi za varovanje pred poplavno nevarnostjo, torej če objekt odstranimo iz struge vodotoka povečamo možnost poplavljanja v času visokovodnih dogodkov. Odstranitev objekta bo imel direkten vpliv na transport sedimenta in hidromorfološke procese. Dokler se ne doseže ravnotežja nad ponovnim stanjem lahko traja več let, odvisno od tipa reke, velikosti sedimentov ter od velikosti prečnega objekta, ki smo ga odstranili iz struge in nenazadnje tudi pojavnosti poplavnih dogodkov. Odziv odseka na originalno konstrukcijo objekta nakazuje zmožnosti prilagajanja reke na ponovno prilagajanje potem, ko se objekt zopet odstrani iz struge vodotoka. Vpliv odstranitve objekta na dno struge in procese, ki se odvijajo v strugi vodotoka sta razložila Pizzuto (2002) in Doyle (2003). Osredotočila sta se predvsem na raziskovanje hidromorfološkega odziva in možnih trajektorijah struge ki se ponovno vzpostavlja, ko je objekt odstranjen iz vodotoka. Vendar pa je znano, da so vsi hidromorfološki procesi nastali zaradi odstranitve odvisni od lokalnega padca in sedimentov. Hitrost spreminjanja na spremembe je odvisna predvsem od pretoka dela struge vodotoka. Specifični pretok predstavlja koliko sprememb bo v strugi vodotoka [Elbourne in sod., 2013]. Za izračun specifičnega pretoka se uporablja naslednja enačba:

$$q = \frac{\rho g Q S}{w} \quad [30]$$

kjer je:

$Q$ ... pretok [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],

$w$ ... širina struge [ $\text{m}$ ],

$S$ ... padec dna struge [ $\text{m}/\text{m}$ ],

$\rho$ ... gostota vode [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] in

$g$ ... gravitacijski pospešek [ $\text{m}/\text{s}^2$ ].

Odstranitev kakršnega koli prečnega objekta iz struge vodotoka lahko povzroči kompleksen, nepričakovan in dolgoročen vpliv na rečni režim. Prečni objekti imajo velik vpliv na vzdolžni potek struge vodotoka v smislu prenosa sedimentov, hranil in prehodnosti za rečne organizme, zato bodo v dolgoročnem smislu potrebna popolna odstranitev iz struge vodotoka [Bond, 2013].

## 6.2.2 Obnova, prenova ali popravila

Prvi pomembni korak pri definiranju ali je objekt potreben prenove ali ne, je ocena trenutnega stanja. Ekološke in arheološke vrednote morajo biti ustrezno zavarovane in presoditi, da se jih ustrezno ohrani in zavaruje. Inženirji bi morali koherentno sodelovati z ribiči, s katerimi pridejo do skupnih ugotovitev in zagotovil za ustrezno prehodnost vodnim organizmom. Pri obnovi naj bi se kolikor je le mogoče s stališča hidravličnih obremenitev sprejemljivo uporabljali obnovljivi in naravi prijazni ter trajnostnimi materiali [Rickard, 2003].

Prečni objekti morajo biti dimenzionirani robustno, pri čimer je dosežena dovolj visoka trdnost in so zmožni prilagajanja spremembam v okolju struge vodotoka. To pomeni, da bo temelj objekta imel daljšo življenjsko dobo kot mehanska oprema na objektu. Nekateri objekti so potrebni modernizacije z vidika izboljšanja prehodnosti za vodne organizme in rečnega življenja. Vzpostavitev prehodnosti pa ni namenjena samo ribam, kar biologi velikokrat poudarjajo. Za doseganje daljše življenjske dobe objekta je priporočljivo, da je objekt deležen potrebnega popravila in izboljšav. Skozi leta je bilo največ izboljšav predvsem na področju izgradnje ribjih stez in izboljšanje rečnega habitata. Ostale posodobitve

so bile izvedene z namenom uporabe moderniziranih postopkov, večje varnost pred poplavljanjem in izboljšanje hidravličnih razmer [CIRIA, 2016].

Popravilo (npr.: polnjenje razpok v betonski konstrukciji) izvedemo na objektu, ki se je poškodoval skozi čas. Sanacija je temeljna intervencija v vodotoku z modernizacijo elementov na objektu do prejšnje oblike (pred poškodbo). Izboljšava omogoča možnost uporabe sodobne tehnologije in metod. Obnovitve in izboljšave so bolj zahtevne v primeru, ko poškodbe niso vidne, ker so pod vodo ali pa v zemlji. Najprej je pomembno določiti trenutno stanje objekta, na podlagi tega se določi ustrezen ukrep, ki nastalo situacijo omili oziroma izboljša. Resnost in razsežnost nastalih razpok na objektu je razvidna šele takrat, ko je znižana gladina vode za objektom. V večini primerov se stanje objekta lahko oceni potem, ko so na njem že vidne razpoke na objektu in je lahko že prepozno. Popravilo in izboljšava objekta se ne sme nanašati le na popravilo materiala ampak tudi na naslednje [CIRIA, 2016]:

- obratovalne in vzdrževalne postopke,
- zagotavljanje ustrezne varnosti,
- hidromorfološke in ekološke funkcije,
- kjer je potrebno vzpostaviti komunikacijske in v izrednih stanjih protokole, ki se nanašajo na poplavljanje.

### **6.2.3 Zamenjava starega objekta z izgradnjo novega objekta**

Z ustreznim dimenzioniranjem in obnovitvenimi deli, novi ali zamenjani objekti lahko služijo več desetletij, z upoštevanjem modernizacije in obnove električne in mehanske opreme. Odločitve sprejete med dimenzioniranjem objekta in samo izgradnjo objekta lahko preteče daljše časovno obdobje. Sploh v primerih izgradnje bolj kompleksnih objektov. Pri tem je potrebno, da so le ti planirani in dimenzionirani na takšen način, da je vsem v interesu in je izbrana najboljša razpoložljiva rešitev.

Eden izmed namenov za postavitev novega objekta je predvsem ta, da z njegovo pomočjo merimo pretoke, gladine in izvajamo razne monitoringe na izbranem vodotoku. Nižji prečni objekti služijo za izboljšavo biodiverzitete v rečni strugi ter za zmanjšanje prekomerne erozije. Z njimi namreč zagotavljamo ustrezno vodnatost vodotokov, ki je ključna v času sušnega obdobja. Ponovna gradnja objekta lahko predstavlja povsem nov začetek in s tem uporabo ustreznih novih materialov. V kolikor, po izgradnji novega prečnega objekta, pride do lokalnega povišanja gladine vode gorvodno in predstavlja nevarnost za ogrožene habitate je potrebno presoditi, če je ta ukrep ustrezen in primeren. Iz okoljskega vidika gorvodna gladina predstavlja območje mokrišč, ki se ga lahko izrabi. Novi objekti morajo biti postavljeni na takšni lokaciji, da ni potrebno izvesti velikih posegov v obrežno vegetacijo. [Rickard, 2003].

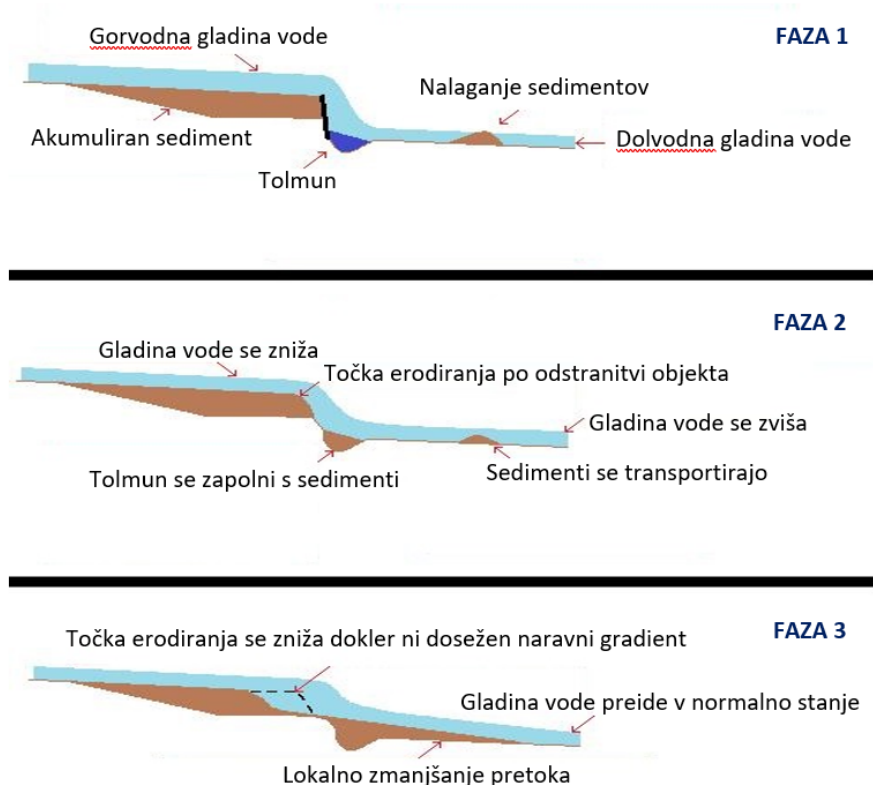
V fazi popravila objekta ima večje ekološke posledice vpliv potrebne mehanizacije za obnovo objekta, kot pa sam objekt v strugi vodotoka. Brežine struge dolvodno so neizbežno podvržene erodiranju. Materiali morajo biti previdno izbrani, poslužujemo se predvsem uporabi naravnih materialov kot npr. kamna, opeke in lesa, ki jih ustrezno kombiniramo z betonom, da dosežemo pričakovano mehansko odpornost in trdnost objekta. S tem si zagotovimo tudi manjše skrbi glede vzdrževanja objekta [Rickard, 2003].

Če se le da, se izognemo gradnji novih prečnih objektov. Osredotočiti se moramo na obnovitvena in nadomestitvene objekte na že obstoječih objektih. V naslednjih primerih se še vedno odločimo za izgradnjo povsem novega objekta:

- zamenjati obstoječi objekt, ki je že tako poškodovan, da ni ekonomsko upravičeno popravilo,
- zamenjava obstoječega objekta ni možna glede na trenutne situacije in ni ekonomsko upravičeno,
- v primeru, da je bila spremenjena namembnost objekta (npr. za namen odvzema pitne vode).

### 6.3 Posledice odstranitve prečnega objekta na strugo vodotoka

- Gladina zgornje vode se bo znižala, zaradi erozije struge vodotoka. Gladina spodnje vode se bo zvišala in bo dosegla enak nivo gorvodni gladini. Pri tem bo dosežena boljša pretočnosti odseka.
- Drobnnozrnati sedimenti in material, ki se je skozi leta nalagal za objektom, bo imel prosto pot dolvodno. V kolikor se je sediment nalagal več let, je ta lahko onesnažen ali pa vsebuje precejšnjo vsebnost organske snovi, zato je potrebno presoditi, če je odstranitev objekta s tega vidika sprejemljiva oz. kakšni dodatni ukrepi bi se morali izvesti, da bi se sproščanje potencialnega onesnaženja s sedimenti omejilo.
- Odstranitev takšnega objekta poviša vlečno silo vodnega toka (le kratkotrajen pojav). Odvisno od morfologije struge vodotoka, to lahko povzroči poglobljanje struge, prekomerno erozijo brežin in prenos vodne energije dolvodno, kar povzroči erozijo tudi tam.
- Povečane vlečne sile vodnega toka povzročijo večji transport sedimentov dolvodno, kjer se odlaga, ko je pretok v strugi zmanjšan in ni več zmožen transporta sedimenta.



Slika 19: Spreminjanje dna struge po odstranitvi prečnega objekta iz struge vodotoka (Bond, 2013).  
*Figure 19: Changing the riverbed after removing a weir from the watercourse (Bond, 2013).*

Iz zgornje slike (Slika 19) je razvidno, da spreminjanje dna struge vodotoka, po odstranitvi objekta, poteka v treh fazah. V prvi fazi je prikazan vzdolžni profil odseka vodotoka, kjer se objekt še vedno



nahaja v strugi. Za prečnim objektom se kopičijo sedimenti, pred njim v smeri toka vode pa je prisoten erozijski tolmun. Nekoliko bolj dolvodno se kopičijo sedimenti, ki so bili erodirani iz tolmana. Druga faza prikazuje stanje kmalu po odstranitvi objekta iz struge vodotoka. Gladina vode za objektom naglo upade, moč toka se poveča in tako erodira in odnaša sedimente dolvodno. Dolvodna gladina se tako poviša, tolmun se zapolni s sedimenti. Tretja faza nastopi šele, ko se že vzpostavi novo ravnovesno stanje, kjer moč toka ni več takšna, da bi še vedno erodirala sedimente in jih transportirala dolvodno. Gladina vode zopet preide v normalno stanje in sledi postopno preoblikovanje zveznega padca dna struge. Pri tem je potrebno dodati, da potek struge vodotoka ne bo povsem enak, kot je bil pred postavitvijo objekta v strugi vodotoka.

Zajeda, ki nastane po odstranitvi objekta iz struge vodotoka potuje gorvodno. To obliko erozije imenujemo zadenjska oziroma retrogradna erozija. Za to vrsto zajede je značilno, da se pomika v nasprotni smeri rečnega toka. Pri tem pa erodira sedimente ali celo kamnino [Tičar, 2012].

Vplivi povezani z odstranitvijo objekta morajo biti določeni na podlagi analize hidromorfoloških procesov, hidravličnih terenskih meritev ter z uporabo orodij za modeliranje gibanja vodnega toka. Na ta način se lahko določi potencialne posledice in zagotoviti ustrezno stabilnost, kjer je to potrebno. V veliko primerih ta problem nastane v trenutku, ko je objekt odstranjen iz vodotoka, čez čas pa se razmere vsaj začasno stabilizirajo. Strokovnjaki morajo imeti podatke o tipu vodotoka in hidravličnih karakteristikah vodnega toka (moč vode po odstranitvi objekta), da znajo določiti potencialne vplive na strugo vodotoka, potem ko se objekt odstrani. Ključna je presoja vplivov z vidika poplavne varnosti in spremljajočih erozijskih procesov.

Pri samem odstranjevanju takšnih objektov iz struge vodotokov, je potrebno tudi presoditi na kakšen način je treba objekt odstranjevati. V kolikor gre za višji objekt, ali pa se nahaja na območju, ki predstavlja veliko tveganje za erodiranje brežin je potrebno objekt odstraniti po stopnjah. To pomeni, da v prvem koraku odstranimo le en del objekta in v predvidenem časovnem sosledju še preostale dele. Med obema stopnjama odstranitve objekta mora biti ustrezen časovni korak. Pretekli čas je odvisen od deleža objekta ki je bil odstranjen, pretoka čez objekt in sedimentov v strugi vodotoka. Po določenem času se ustvari novo ravnovesje in lahko odstranimo še preostali del objekta. Dinamiko odstranjevanja objekta presodi izkušen inženir, ki analizira lokalne hidromorfološke pogoje in predpostavi koliko sedimenta se bo transportiralo.

Doyle (2003) in njegova ekipa je definirala šest korakov do vzpostavitve nove struge po odstranitvi objekta iz struge vodotoka. Ti koraki zajemajo naslednje lastnosti:

- a) Pogoje pred odstranitvijo objekta, kar zajema tudi kopičenje sedimentov za objektom.
- b) Razmere, ki nastanejo takoj, ko odstranimo objekt iz struge vodotoka.
- c) Sprememba naklona struge in nastanek ozke, globoke s strmimi brežinami struge vodotoka.
- d) Čedalje širša struga in erodiranje brežin.
- e) Nadaljevanje z erodiranjem struge in nastanek poplavne ravnice.
- f) Vzpostavitev novega ravnotežnega stanja.

#### **6.4 Preoblikovanje struge vodotoka po odstranitvi prečnega objekta iz vodotoka**

Land in sod. (2017) so izvedli študijo, v kateri so ugotavljali, na kakšen način ter kako se časovno preoblikujejo struge vodotokov, kot posledica odstranitve prečnega objekta iz vodotoka. Raziskava je potekala na hribovitem območju pod naravnimi procesi v umetno ustvarjeni strugi. Prag je meril v višino

1 m in 12,65 m v širino, ter je bil narejen iz naravnih materialov. Dno struge je sestavljalo drobnozrnat sediment (predvsem melj in glina) zaradi katerega je bila sprejeta odločitev, da se odstranitev objekta izvede v treh delih. Akumulirane sedimente in 16-metrov dolg gorvodni odsek vodotoka so spremljali in merili tedensko od januarja 2014 do marca 2015. Objekt je bil odstranjen v treh delih, po 30 cm v razmaku 58 dni. Prvih 30 cm objekta je bilo odstranjenih 27. januarja 2014, 14 dni kasneje naslednjih 30 cm in po 58-ih dneh (od prve odstranitve) še zadnji, tretji del. Izvajali so meritve na šestih točkah gorvodno od objekta za obdobje 15 mesecev. Meritve so pokazale, da je proces gorvodnega erodiranja trajal 10 mesecev, kjer je odnašalo približno štiri cm na dan. Meritve so potekale še nadaljnjih pet mesecev, za katere se je izkazalo, da erodiranje ni imelo več velikega vpliva. V kolikor so na dnu struge nahajali drobnozrnati sedimenti, lahko njihovo premeščanje povzroči že manjši pretok in ne nujno visokovodni dogodek.

Magilligan in sod. (2015) so izvedli študijo odstranitve 6 metrov visokega pragu (pregrada Pelham) na območju Amethyst Brook v centralnem Massachusetts. Raziskovali so odziv struge vodotoka na odstranjen objekt, pri čemer so se osredotočili na 300-m dolg odsek gorvodno in 750-m dolg odsek dolvodno od objekta. Osredotočili so se predvsem na akumulirane volumne materiala pred pregrado, ter njihovo dolvodno erozijo. Struga vodotoka je imela naklon (1-2%), zrnava sestava plavin je bila prodnata.

Pelham pregrada je bila odstranjena jeseni 2012. Prečni objekt je bil že dotrajan in je meril v višino 6 m in širino 50 m. Lastnik prečnega objekta je v sodelovanju z lokalno, regionalno in državno skupnostjo ter ne vladnimi organizacijami dosegel, s skupnimi interesi, ponovno vzpostavitev možnosti prehajanja za vodne organizme, izboljšanje transporta sedimenta in organskih snovi s tem pa izboljšanje ekologije dolvodno in zmanjšanje nevarnosti poplavljanja in nevarnosti povezane s porušitvijo objekta.

Šest mesecev po odstranitvi objekta je prišlo do visokovodnega dogodka (s povratno dobo 10 do 20 let), ki je povzročil še večjo tako dolvodno kot tudi gorvodno erozijo. Ugotovili so, da v kolikor tega dogodka ne bi bilo, erozijski procesi ne bi bili tako izraziti, kot so dejansko bili. Poleg tega, pa je intenzivna globinska erozija odkrila tudi lesen prag (120 m gorvodno od prečnega objekta). Tega pragu ni bilo mogoče identificirati v pred-odstranitvenem času, ker tudi ne obstajajo kakršni koli zapisi o njem. Meritve v strugi vodotoka so prikazale, da je vpliv erozije segal 290 m gorvodno nad objektom. Odstranitev objekta je povzročila manjše spremembe v strugi dolvodno, vendar pa je bil ta vpliv nižje vzdolž vzdolžnega profila (750 metrov).

Tretji avtor Prezzuto (2015) v svojem članku omenja, da je Gerrits (1994) dokumentiral 300 m gorvodni erozijski vpliv. Meritve je izvajal eno leto, pri čemer je bil odstranjen 10-metrski prag v Pennsylvania, v Združenih državah Amerike.

Evropski projekt Amber [Coghlan, 2020] zajema konkretne primere odstranjevanja prečnih objektov, njihovo postavitve in obnovo. V okviru projekta je bilo analiziranih sedem študij, katere so zajemale praktično ozadje preizkušenih metod. Študije so zajemale različne tipe prečnih objektov, ki pokrivajo široko geografsko evropsko območje od Andaluzije v Španiji do severne Škotske.

Za namen magistrske naloge smo se posvetili predvsem delu, ki govori o odstranjevanju prečnih objektov v strugah vodotokov. Obravnavani primeri so se nanašali na odstranitev manjših prečnih objektov, kot je tudi primer, ki ga obravnavamo v nadaljevanju magistrskega dela. Odstranjenih je bilo 10 objektov na rekah v Združenem kraljestvu in 12 na Danskem. Rezultati so pokazali, da se spremembe v vodotoku razlikujejo od lokacije do lokacije, v kolikor gre za nižinske vodotoke na Danskem, ali nekoliko strmejšee vodotoke v Združenem kraljestvu. Vendar pa ti še vedno niso primerljivi s tipičnimi hudourniškimi rekami v Sloveniji.

Ena izmed študij se je navezovala na reko Munster Blackwater. Ta je ena izmed večjih rek na Irskem, katera je znana po lovljenju lososov. Uvrščena je na seznam posebno ohranjenih območij (ang. SAC – Special Area of Conservation) po EU Direktivo o habitatih. Na reki sta dva večja objekta, ki merita 2,5 m v višino, služila sta kot usmerjevalna objekta za mlinščice, oba pa sta imela ribje steze, ki sta omogočili migracijo ribam. Poleg tega pa je v vodotoku še več manjših prečnih objektov. V sklopu projekta so popisovali gostoto ribje populacije. Pri tem so bile zajete tudi karakteristike vodotoka: globina, velikost sedimenta in vegetacija v vodotoku.

Namen projekta je bil definirati gostoto rib na območju prečnih objektov in možnost prehoda le tega. Rezultati so pokazali, da tako gorvodno kot dolvodno od prečnega objekta ostajajo cone, ki so neprimerne za ribje vrste. To pomeni, da je hitrost vode premajhna, da bi omogočala kakovostne življenjske pogoje organizmom. Optimalna območja se nahajajo predvsem v glavni strugi vodotoka ob nizkih pretokih. Ugotovljeno je bilo, da kar 69% obravnavanega območja ni primerno za življenje vsem vodnim organizmom.

Za izboljšanje neugodnih življenjskih razmer bi se lahko prečne objekte na vodotoku odstranilo. Vendar pa ta možnost v tem primeru ni bila možna. Obstajajo namreč različni razlogi, ki so povezani tudi z ostalimi problemi, možnostmi in posledicami, ki lahko nastanejo po odstranitvi prečnih objektov iz struge vodotoka. Edini pozitivni vidik odstranitve objekta iz struge vodotoka je ponovna vzpostavitev prehoda za rečne organizme. Še vedno pa obstaja veliko skrbi povezanih z odstranitvijo prečnega objekta:

- Šok za organizme, ker so prilagojeni na življenje v trenutnih razmerah.
- Prečni objekt ima lahko kulturno ali tehnično vrednost.
- Odstranitev ima lahko velike vplive na gorvodne in dolvodne habitate, prav tako pa se spremeni tudi rečni režim.
- Pojavi se erozija struge in brežine, kar povzroči enakomeren padec struge.
- V kolikor se območje uporablja tudi za rekreacijska območja, ta niso več primerna po odstranitvi objekta.
- V nekaterih primerih objekte uporabljajo za uravnavanje nivojev gladin vode za potrebe zagotavljanja pitne vode ali industrijsko vodo.

Priporočeno je, da v kolikor je le mogoče, se pred izbiro katerega koli scenarija upoštevajo in obravnavajo vsi premisleki, te pa je potrebno, skupaj z zadržki ustrezno zabeležiti na uraden način.

Druga študija, ki je obravnavala odstranjevanje prečnih objektov iz vodotokov je bila izvedena na Danskem in Združenem kraljestvu. 12 prečnih objektov je bilo odstranjenih na Danskem, pri tem pa so opazovali in merili spremembe v vodotoku (globina, pretok in sedimente) kot tudi gostoto ribjih organizmov.

Spodnja *Slika 20* prikazuje primer odstranitve prečnega objekta iz struge vodotoka in posledično izboljšanje okoljskih razmer na istem odseku. Iz fotografije tlorisnega poteka je razvidno, da se je trasa struga vodotoka že začela spreminjati.



Slika 20: Primer odstranjenega objekta na Danskem prej (levo) in potem (desno) (AMBER, 2020).  
*Figure 20: Example of a removed weir in Denmark before (left) and after (right) (AMBER, 2020).*

Rezultati študije so pokazali, da je kratkoročni vpliv odstranitve objekta različen za vodotok na Danskem ali v Združenem kraljestvu. Odstranjeni objekti na Danskem so bili višji (do dveh metrov), z manjšimi nakloni in z večjimi vplivi na spremembo vodotoka, po njegovi odstranitvi. Rezultati meritev so pokazali, da zrnavostna sestava sedimentov najbolj vpliva na preoblikovanje struge vodotoka. Velikost sedimenta pa je tudi posledica hidravličnih razmer [Coghlan, 2020].

Analize in ugotovitve so pokazale, da se izboljšajo hidravlične razmere v vodotoku takrat, ko se odstrani objekt višine 1-2m, kjer je padec struge majhen in odstranitev objekta ne bo vplivala na poslabšanje kvalitete vode. V primeru, ko odstranjujemo majhne objekte (do 0,5m) pri velikem padcu nivelete struge, z odstranitvijo posameznih objektov posredno vplivamo na naravne procese. Razlika se pokaže, ko zaporedno odstranimo večje število objektov ter po nekem časovnem obdobju. Do ponovne vzpostavitve rečnega življenja in naselitev novih in starih ribjih vrst lahko traja tudi nekaj let.

Z raziskavo so v Veliki Britaniji ugotovili, da bi z odstranitvijo majhnega deleža prečnih objektov (<10%) prineslo pozitivne učinke za vodotok. Z odstranitvijo ostalih 90% prečnih objektov bi poslabšali razmere v vodotokih. Ti se namreč uporabljajo za zadrževanje poplavnih konic ali za namene infrastrukture. Prav tako imajo lahko velik pomen za kulturno in naravno dediščino, ali pa je njihova odstranitev ekonomsko neupravičena.

Eni izmed pozitivnih učinkov odstranjenih objektov so se pokazali na Danskem, kjer je neka določena vrsta rib migrirala gorvodno in se zadrževala na območjih, kjer ji do sedaj to ni bilo omogočeno.

Iz zgoraj opisanih študij je razvidno, da moramo biti pozorni na veliko različnih potencialnih dejavnikov, ki vplivajo na razvoj struge po odstranitvi prečnega objekta iz struge vodotoka. Kot ključne dejavnike bi torej na podlagi pregledane literature izpostavili naslednje lastnosti:

- Hidrološke značilnosti območja ter hidravlične razmere v strugi, katere vplivajo na sam potek in hitrost erodiranja gorvodno ter odlaganja sedimentov dolvodno od prečnega objekta.

- Velikosti sedimentov v strugi vodotoka določajo strižno napetost, s katero lahko napovemo koliko sedimentov se bo transportiralo.
- Hidromorfoloških vplivov glede na tip vodotoka, v kolikor gre za hudourniške ali nižinske vodotoke.
- Velikost prečnega objekta bo imel velik vpliv na samo dolžino gorvodnega in dolvodnega odlaganja/erodiranja.

Prav tako je potrebno upoštevati možnost visokovodnih dogodkov, ki lahko povzročijo večjo erozijo, kot je sprva predvideno. Na koncu velja poudariti, da so bile odstranitve objektov izvedene večinoma na nižinskih vodotokih, ki so po hidroloških razmerah na prispevnih območjih ter hidravličnih razmerah v strugah precej drugačni kot so vodotoki na območju Slovenije.

### 6.5 Omejitve izvajanja sanacijskih del v vodotoku

Omejitve, ki nastanejo zaradi izvajanja sanacijskih del v vodotoku so različne. V nadaljevanju so našteje najpomembnejše in le nekatere so predstavljene:

- Ena izmed omejitev je določitev lastnika objekta, s tem pa tudi pridobitev soglasja lastnika, katerega parcela leži v bližini struge vodotoka (preko katere je urejen npr. dostop z gradbeno mehanizacijo), kjer bi se izvajala sanacija,
- premalo znanja in znanih metodologij za delo v bolj urbanem okolju,
- velikokrat pride do konfliktov z upravljavci hidroenergetskih objektov,
- težka dostopnost do samega objekta,
- odstranitev objekta ima lahko katastrofalne posledice na biodiverzitetu in za odstranitev takšnega objekta so predstavljene le prednosti in ne tudi negativne posledice,
- posebna pozornost v primeru, ko se objekt nahaja na aluvialnih naplavinah, ki so problematične z vidika temeljenja,
- potrebno je izvesti detajlno projektiranje,
- pridobiti dovoljenja lokalnega prebivalstva in ostalih interesnih skupin,
- prednosti se nanašajo le na obravnavani odsek, v kolikor so še ostali objekti nahajajo gorvodno ali dolvodno tudi to predstavlja problem,
- potrebno je upoštevati stroške mehanizacije za odstranjevanje objekta,
- ustrezna zakonodaja in interes ustreznih državnih/politikov na tem področju,
- nevednost glede spreminjanja hidromorfologije zaradi velike vodne moči,
- čas trajanja odstranitve objekta,
- kontrola erozije tako na dnu struge kot tudi brežin,
- mnenje občanov lahko zelo vpliva na končne cilje projekta,
- stroški odstranitve objekta oziroma njegove obnove,
- v nekaterih primerih je težka dostopnost do objekta, predvsem ko je za odstranitev potrebna velika mehanizacija,
- tehnična dokumentacija,
- kulturni in ribiški interes,
- financiranje odstranitve objekta,
- prednosti ali slabost ki se nanašajo na poplavno varnost,
- arheološki interesi,
- ustrezne strokovnjake na projektiranju ribjih prehodov,
- glede na naravo betona in brežin je bolje objekt nekoliko znižati, kot pa ga popolnoma odstraniti.

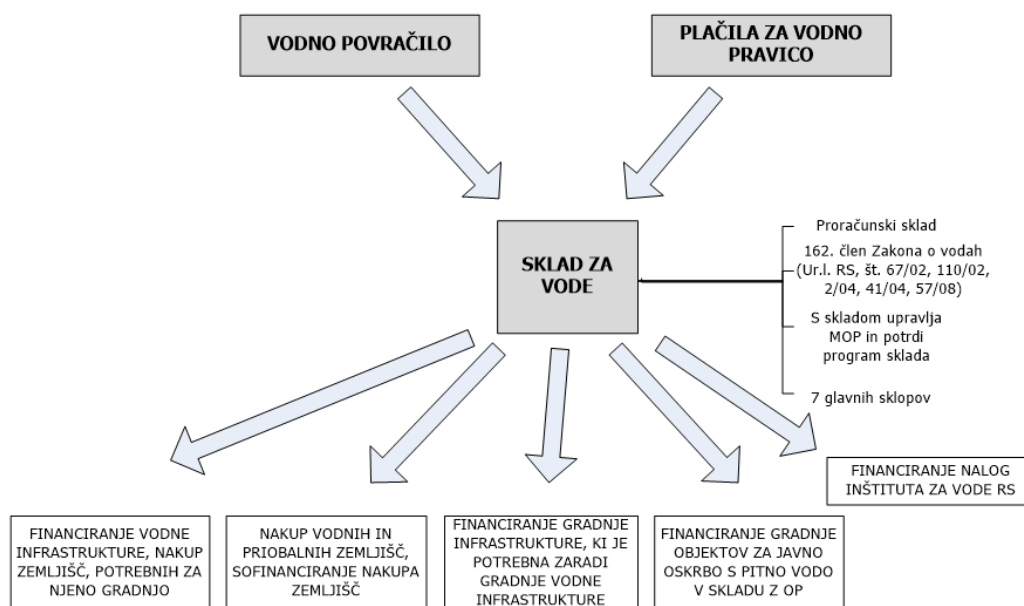
Zgoraj omenjene omejitve izvajanja sanacijskih del v vodotokih se nanašajo predvsem za objekte, ki se nahajajo v Združenih državah Amerike.

### 6.5.1 Finančna sredstva

Za zagotavljanje ustreznega načrta upravljanja z vodami je potrebno zagotoviti ustrezna finančna sredstva za izvedbo temeljnih ukrepov. Finančna sredstva za sanacijska dela v vodotokih so lahko zagotovljena iz državnih skladov, državnega proračuna, javno-zasebnega partnerstva, iz mednarodnih skladov, evropskimi sredstvi ali iz kohezijskega sklada. Sklad za vode Slovenije (*Slika 21*) pridobi vsako leto nekaj sredstev iz državnega proračuna, ki so namenjena za osnovna vzdrževalna in intervencijska dela potrebna v vodotokih. V Sklad se stekajo sredstva, ki so bila zbrana s plačili za vodne pravice in povračila. Plačila za vodna povračila predstavljajo 80% finančnih sredstev. Ostala sredstva (20%) so prihodki od podeljenih koncesij za rabo vodnega ali morskega javnega dobra ali naplavin [Bizjak, 2010].

162. člen Zakona o vodah [UL, RS, št. 67/02, 65/20] je namenjen Skladu za vode. Z njim upravlja ministerstvo, ki se za nedoločen čas ustanovi kot proračunski sklad. Sredstva s Sklada se uporabijo za financiranje:

- vodne infrastrukture, vključno z nakupom zemljišč,
- gradnja infrastrukture (lokalne in državne), ki je potrebna zaradi vodne infrastrukture,
- izvajanje strokovnih nalog ministrstva, ki so povezana z izdelavo načrtov upravljanja voda, naloge v zvezi s podeljevanjem vodnih pravic in izdajanje vodnih soglasij, določitev meje vodnih ter priobalnih zemljišč ter naloge, ki so povezane z določitvijo parcele vodnega zemljišča,
- vodni zadrževalniki (gradnja in posodobitev), ki so namenjeni za namakanje kmetijskih zemljišč,
- nakup vodnih in priobalnih zemljišč ter sofinanciranje nakupa priobalnih zemljišč,
- strokovne in razvojne naloge za izvajanje tega zakona,
- projekti za gradnjo objektov, ki se nanašajo na črpanje, filtriranje in zajem vode ter prenosnih vodovodov za zagotavljanje javne oskrbe s pitno vodo.



Slika 21: Delovanje Sklada za vode (Bizjak, 2010).  
Figure 21: Operation of the Water Fund in Slovenia (Bizjak, 2010).

Iz javnega sklada Republike Slovenije za regionalni razvoj in ohranjanje poseljenosti slovenskega podeželja so upravičeni tudi projekti, s katerimi izboljšujemo stanje okolja in so hkrati regionalnega pomena. Financiranje se usmerja v graditev naprav, ki zajemajo lokalno in regionalno infrastrukturo in je v večinski lasti države oziroma lokalne skupnosti.

Področja financiranja, ki so omogočena iz sklada za regionalni razvoj in ohranjanje poseljenosti podeželja so naslednja:

- financiranje gradnje naprav za lokalno in regionalno javno infrastrukturo, ki je v večinski lasti države ali lokalne skupnosti,
- sofinanciranje investicij v kmetijsko pridelavo.

Kohezijski sklad je namenjen sofinanciranju projektov na področju okolja ter prometa. Namen sklada je dvigniti raven razvoja za države EU, ki ne presegajo 75% povprečnega BDP skupnosti. Sklad je namenjen vsem državam članicam EU z bruto nacionalnim dohodkom, manjšim od 90% povprečja EU. S tem se zmanjšujejo ekonomske in socialne razlike ter se spodbuja k trajnostnim razvojem. Ta financira do 85% upravičenih izdatkov večjih projektov s področja okoljske in prometne infrastrukture. Med okoljsko infrastrukturo spada tudi upravljanje z vodami in vzdrževanje vodnih območij.

### 6.5.2 Lastništva prečnih objektov

Vodna infrastruktura je večinoma v lasti države oziroma izvajalca javne službe. Vodna infrastruktura z zemljišči na katerih je zgrajena, ni grajeno javno dobro in ni mogoče pridobiti lastninske pravice s priposestvom. V primeru stečaja javne službe postane vodna infrastruktura last države. Država je torej pristojna za upravljanje z obstoječo vodno infrastrukturo. V nekaterih primerih pa so prisotne tudi

druge osebe, pri čemer se razmerje med državo in drugimi osebami glede upravljanja, obratovanja in vzdrževanja uredijo s pogodbo [Globevnik, 2012].

Vsa vodna zemljišča v lasti države niso v pravnem prometu, zato prenos lastninske pravice ni možen tako na pravne kot fizične osebe.

Sporazum o uporabi stvarnega premoženja se sklene takrat, ko želi drugi državni organ uporabljati vodno ali priobalno zemljišče, ki je v lasti države. Pri tem se uredijo medsebojne pravice in obveznosti v zvezi s tem zemljiščem.

Lastnik ali uporabnik zemljišča ali objekta, ki se nahaja ob vodotoku ali na priobalnem zemljišču, je dolžan upoštevati zakone, predpise in uredbe, ki obravnavajo kakršnokoli poseg na vodno ali priobalno zemljišče. V kolikor se bodo izvedli posegi na zemljišču je potrebno pridobiti vodno soglasje, katerega izda DRSV [DRSV, 2021].

### 6.5.3 Ekološka presoja

Naravovarstvene vsebine dobivajo čedalje večjo vlogo pri upravljanju z vodami. Ključni strategiji, ki usmerjata države članice EU, pri ohranjanju biotske raznovrstnosti in upravljanju z vodami sta: - Strategija EU za biotsko raznovrstnost do leta 2020 in -Okvirna vodna direktiva. Med seboj sta povezana in njun namen je usmerjati trajnostno upravljanje z vodami, kjer se ohranja vodo in biotsko raznovrstnost [Juran, 2015]. Različni posegi v vodotokih, ki se izvajajo v obsegu sanacijskih, vzdrževalnih in intervencijskih del, lahko negativno vpliva na vodne in obvodne organizme kot tudi na njihove habitate. V tem delu je prikazana škodljivost neustreznih posegov z vidika ribištva.

Načrti s področja upravljanja voda morajo postati orodja za učinkovito izvajanje naravovarstvene zakonodaje, pri čemer je upoštevan tudi načrt za upravljanje območij Natura 2000 za upravljanje z vodami. S tem je dosežen cilj ohranjanja narave. Z upoštevanjem usmeritev in smernic s področja ohranjanja narave je zakonodaja primerna za upravljanje naravovarstvenih vsebin. Naravovarstvene smernice pripravlja organizacija, ki je pristojna za ohranjanje narave.

Kot že omenjeno so sanacijska in vzdrževalna dela na vodotokih del vodnogospodarskih nalog, urejanj vodotokov zaradi zagotavljanja poplavne varnosti, odpravljanje posledic poplav, zaščite vodne in ostale infrastrukture, poplavljanju poškodb na objektih vodne infrastrukture ter zagotavljanje funkcionalnosti objektov vodne infrastrukture. Z vsemi posegi v vodotok se spremenijo pretočnost in prodonosnost vodotoka, pri čemer se spremeni tudi hidromorfologija struge vodotoka. Posledice se občutijo kot sprememba v sestavi usedlin, fizikalno-kemijskih in biotskih lastnosti vode. Vse te spremembe vplivajo na spremembo v vrstni sestavi, velikosti populacij, prostorski razporeditvi vrst, velikostni in starostni strukturi populacij.

Z različnimi posegi v vodotoku negativno vplivamo na vodne organizme. Naslednji posegi v strugo vodotoka, ali njegovo neposredno bližino najbolj negativno vplivajo na združbe rib in njihove habitate: betoniranje struge; stabilizacija struge, pri čemer je uporabljen kamnomet ali skalomet; postavitve vodnih pregrad in odstranitev obrežne vegetacije [Zabric in sor., 2010]. Da se temu izognemo je, kjer je to mogoče, priporočljiva gradnja sonaravnih ureditev z uporabo trajnostnih materialov. Pri obnovi struge ohranjamo naravno morfologijo vodotoka. Sonaravna izvedba se izvaja na odsekih, kjer je to izvedljivo in je nujno potrebno, pri čemer se upoštevajo naravovarstveni pogoji pri določenem posegu v vodotok.



## **7 PRESOJA VPLIVOV ODSTRANITVE PREČNEGA OBJEKTA NA KAMNIŠKI BISTRICI**

V magistrski nalogi smo izvedli analizo hidravličnih razmer na odseku Kamniške Bistrice, in sicer smo obravnavali vpliv morebitne odstranitve prečnega objekta (drče), ki se nahaja v naselju Bišče v občini Domžale. Pred nekaj leti je namesto drče stal stabilizacijski prag, ki je bil močno poškodovan in nujno potreben obnove zaradi dotrajanosti objekta. Rekonstrukcija praga v drčo je bila izbrana kot sonaravna rešitev usklajena v sodelovanju s tamkajšnjimi ribiči. V tem delu magistrske naloge je predstavljena metoda dela, hidrološke značilnosti vodotoka, predpostavljeni scenariji preoblikovanja struge in končne ugotovitve ter rezultati.

### **7.1 Hidrološke značilnosti vodotoka**

Kamniška Bistrica je reka v osrednji Sloveniji in je ena izmed večjih levih pritokov reke Save. Reka je dolga 33 km, površina porečja znaša okoli 530 km<sup>2</sup>. Povprečen pretok na reki je 5 m<sup>3</sup>/s, merjeno na vodomerni postaji Vir, kjer se dolvodno nekoliko poveča zaradi pritoka reke Rače. Na obravnavanem odseku je skupni povprečni pretok 10 m<sup>3</sup>/s. Kamniška Bistrica teče po dveh različnih pokrajinah. V zgornjem toku je hudourniškega značaja in teče po večinoma gozdnati in redko poseljeni istoimenski dolini. V srednjem in spodnjem toku pa teče po prodnih naplavinah Ljubljanske kotline, skozi številna precej urbanizirana območja.

Kamniška Bistrica ima značilen snežno-dežni režim s prvim viškom v pozni pomladi in začetku poletja ter drugim viškom jeseni. Prvi višek je posledica spomladanskega taljenja snega in padavin, jesenski višek pa ustvarjajo obilnejše padavine in izhlapevanje je manjše zaradi nižjih temperatur. V sušnih obdobjih ima reka zelo nizek vodostaj, zato je zelo pomembno na kakšen način se izrablja vodni vir v poletnih mesecih. Vzdlž trase struge Kamniške Bistrice potekajo številne mlinščice. Po nekaterih podatkih naj bi bilo v porečju Kamniške Bistrice evidentiranih kar 31 malih hidroelektrarn. Deset od teh je postavljenih na pritokih, ki se izlivajo v Kamniško Bistrico v njenem zgornjem delu porečja. Preostale pa se nahajajo na mlinščicah v srednjem in spodnjem delu porečja [Ljubijankić, 2020]. Pretok v strugi Kamniške Bistrice omogoča k bogatenju podtalnice v Ljubljanski kotlini, katero črpajo tudi za namene pitne vode. Vodotok je v zgornjem toku značilno hudourniške narave. To pomeni, da ob močnejših padavinah vodostaj reke hitro naraste. V času poplavnih dogodkov so pogoste erozijske poškodbe v strugi vodotoka, pri čemer hiter vodni tok spodjeda brežine, prenaša velike količine proda in drugega plavja ter pogosto poškoduje ceste in mostove. Prav tako predstavljajo veliko nevarnosti njeni pritoki, ki se lahko ob močnejših padavinah spremenijo v drobirske tokove ter z nasipanjem in erodiranjem ogrožajo naselja in ceste. Na njej so torej že izvajali sanacijske ukrepe, s katerimi so obnovili poškodovane dele struge vodotoka. Kljub vodnogospodarskim ureditvam na reki obdajajoče poplavne površine niso varne pred poplavljanjem. Ukrepi pa so bili osredotočeni predvsem za varovanje pozidanih delov poplavne ravnice pred poplavi, deloma pa tudi za zmanjševanje erozijskega delovanja in prenašanja plavja. Eden od glavnih vzrokov za veliko število prečnih objektov v strugi je stabilizacija nivelete dna struge, nekateri pa imajo vlogo pri preusmerjanju toka vode iz glavne struge mlinščice [Evreka, 2021].

## 7.2 Metode dela

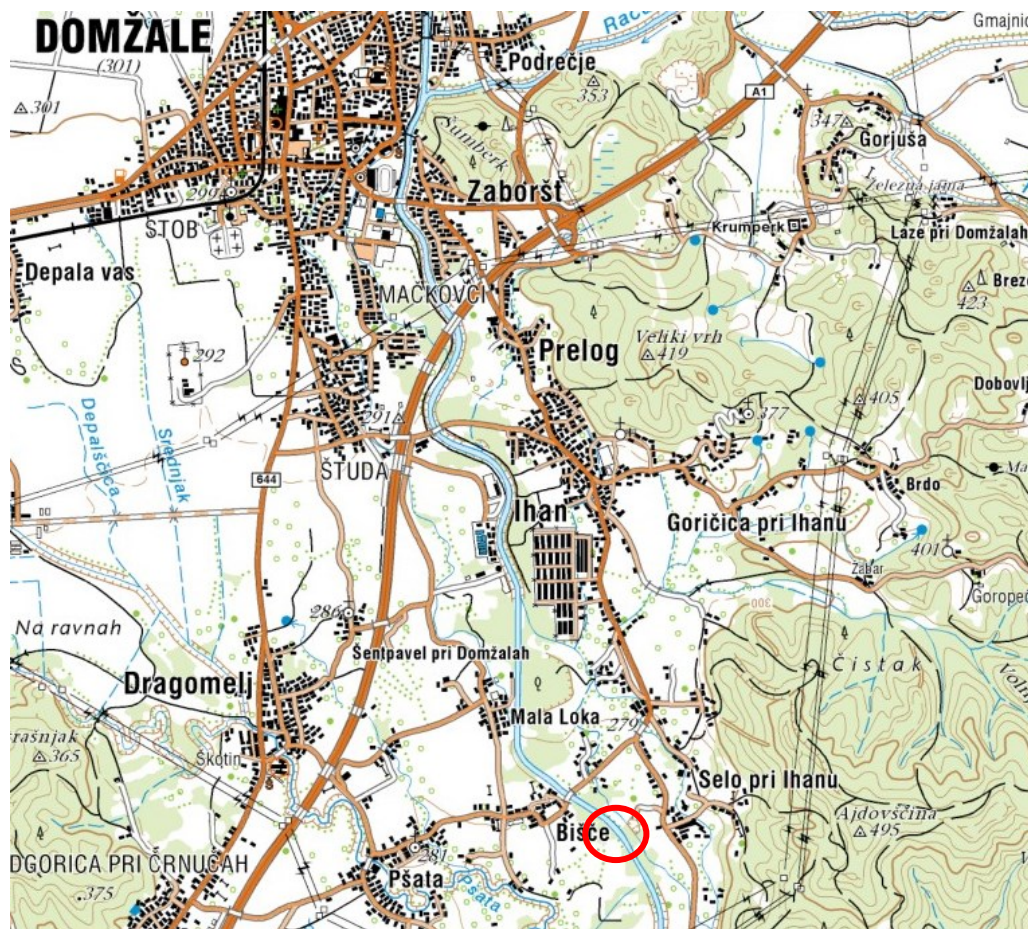
V predhodnih poglavjih smo se seznanili z dejstvom, da je dejanski obseg sprememb geometrije dna v primeru odstranitve objekta zelo težko določiti. Zato smo se odločili za pristop, ko smo predvideli različne scenarije morebitnega preoblikovanja rečnega dna v primeru odstranitve objekta. Literatura na tem področju je sorazmerno omejena in težko dostopna, zato so bile predpostavke za obravnavani primer določene po inženirski presoji. Preučene študije so se navezovala na spremembe v vodotokih, ki se nahajajo v Združenih državah Amerike, kjer so lastnosti vodotokov, na katerih so bile izvedene raziskave drugačne, kot v našem primeru. Poleg tega pa najdemo še nekaj primerov z območja Združenega kraljestva in Danske, ki obravnavajo predvsem nižinske vodotoke.

Sprememba struge vodotoka je v največji meri odvisna od višine prečnega objekta, ki je umeščen v strugo, padca struge in od velikosti plavin, ki se nahaja tako gorvodno kot dolvodno od objekta. Pričakovati je, da sediment gorvodno vsebuje večji delež manjših premerov zrn, kot dolvodno. Pri tem smo predpostavili, da ima odstranjen objekt večji vpliv na transport gorvodnih plavin kot na dolvodno stran, podobno kot je to ugotovil Land [2017].

Na podlagi pedološke karte iz Atlasa okolja je razvidno, da se na obravnavanem območju nahajajo predvsem karbonatna obrežna tla, plitva in delno na peščenem prodnem aluviju. Na podlagi tega smo predpostavili, da se v neposrednem območju struge nahajajo nekoherentni (debelozrnati) sedimenti oz. aluvialne naplavine. Tovrstni aluvialni nanosi so tako predej dovzetni za globinsko erozijo. Na podlagi hidravličnih izračunov s programskim orodjem Hec-Ras smo pridobili rezultate strižne napetosti pri različnih pretočnih razmerah. Na podlagi tega smo lahko z uporabo Shieldsovega diagrama ocenili mejne (kritične) premere plavin.

## 7.3 Predhodno in obstoječe stanje

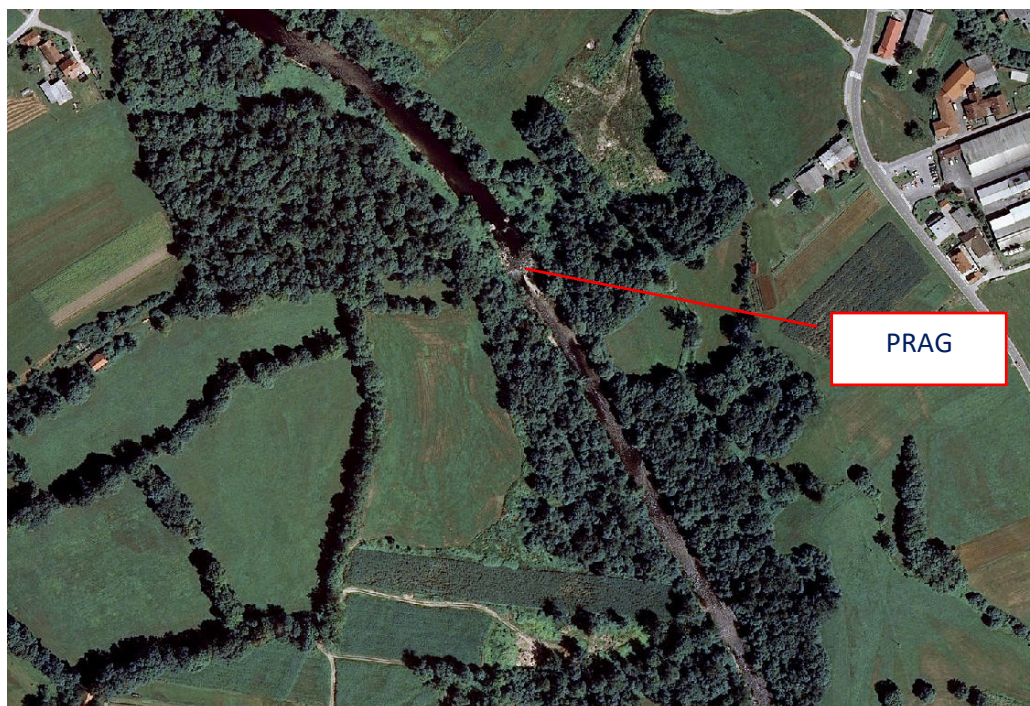
Na začetku tega poglavja je bilo omenjeno, da se je pred leti na isti lokaciji nahajal stabilizacijski prag. Zaradi dotrajanosti objekta je bil ta spremenjen v drčo kot sonaravna rešitev usklajena v sodelovanju z ribiči. Obravnavani odsek Kamniške Bistrice se nahaja 390 m dolvodno od mostu med Biščami in Selom (*Slika 22*). V prvem delu je predstavljeno pred-obstoječe stanje, torej opis in problematika, ko se je še nahajal stabilizacijski prag. V nadaljevanju je predstavljena rešitev preureditve poškodovanega pragu v drčo in obstoječe stanje.



Slika 22: Pregledna karta – lokacija obravnavanega pragu (Geopedija, 2021).  
Figure 22: Overview map - location of the considered weir (Geopedija, 2021).

Približno 200 m dolvodno od mostu so se nahajali ostanki praga, z ocenjeno višino 2-2,5 m (točna višina žal ni poznana), ki je služil za preusmeritev toka vode v mlinščico. Na podlagi digitalnega ortofoto posnetka iz leta 2006 (Slika 23), je razvidno, da je bil stabilizacijski prag že istega leta porušen (Slika 24), žal ni točnega podatka kdaj. Ostanki praga so preusmerjali tok in tako povzročili zajede tako na levi kot tudi na desni brežini. Preden je bil prag saniran in obnovljen v drčo, je minilo 12 let (prenovljen leta 2018), zaradi česar je zajeda na levi brežini (Slika 25) izrazito razvidna in sicer v dolžini 230 m in širine 32 m. Zajeda na desni brežini pa je merila 140 m v dolžino in do 25 m v širino, dolvodno je bila na desni brežini še manjša zajeda dolžine 87 m in širine 13 m.





Slika 23: DOF posnetek iz leta 2006 obravnavanega odseka in porušenim pragom (Tempos d.o.o., 2018).  
*Figure 23: DOF image (2006) of section under consideration and weir removal (Tempos d.o.o., 2018).*



Slika 24: Dolvoden pogled na porušen prag (Tempos d.o.o., 2018).  
*Figure 24: Downstream view of the ruined weir (Tempos d.o.o., 2018).*





Slika 25: Dolvodni pogled na zajedo na levi brežini in prodišče (Tempos d.o.o., 2018).  
*Figure 25: Downstream view of the ravine on the left bank and gravel (Tempos d.o.o., 2018).*

Nekje na sredi obravnavanega odseka se je v dolžini 130 m formiralo tudi prodišče z cca. 1 m višine nanosov plavin.

Tekom projekta sanacije, ki ga je izdelalo podjetje Tempos d.o.o., je bila izvedena sanacija vseh treh zajed (dve na desni in ena na levi brežini) in vzpostavitev normalnega profila struge. Pri tem je bila zagotovljena stabilizacija pretočnih razmer in preprečitev nadaljnjih erozijskih poškodb na brežinah. V sklopu gradnje zavarovanja in zasipa zajed se je iz struge odstranilo vse nanose. Namen projekta je bila sanacija in preprečitev nadaljnjega širjenja erozije. Z predvidenimi posegi se niso spremenile poplavne razmere na obravnavanem odseku.

V sklopu sanacijskih ukrepov je bil spremenjen normalni profil vodotoka, prav tako pa tudi desna ter leva brežina, ureditev dna in stabilizacija nivelete.

Na obravnavanem odseku je bil precejšen padec dna struge (0,7%), zato so z umestitvijo stopnje in drčev v vodotok le tega zmanjšali na 0,35%. Širino struge so prilagodili, da je enaka kot na gorvodni ter dolvodni strani od obravnavanega odseka, pri čemer znaša 21 do 23 m.

Na odseku, kjer sta bili leva ter desna brežina erodirani so le te zavarovali s kamnito zložbo v suho, z naklonom do 1:1,5. Zavarovanja so se ustrezno navezovala na obstoječo levo ter desno brežino, tako gorvodno kot tudi dolvodno.

Za zmanjšanje padca struge je bil predviden prag s stopnjo višine 30 cm v betonu in podslapjem s tolmunom 50 cm. Celotna širina praga v smeri vodnega toka je torej 2,0 m, širina preliva 23,32 m, globina 2,5 m in višino preliva 3,0 m. Pod stopnjo se je izvedel še zaključni prag iz kamna v betonu. Dno podslapja je tlakovano z grobo kamnito zložbo v suho. Nižje dolvodno so izgradili tudi drčev iz grobe kamnite zložbe v suho, dolžine 18,0 m. V osi so naredili pet stopenj višine 25 cm iz kamna v betonu, med njimi so tolmini širine 2,0 m in globine 50-80 cm.

V okviru sanacije odseka se je izvedla tudi odstranitev vseh naplavin, prodišča ter odvoz podrtega drevja in korenin na deponijo.

Na spodnjih dve fotografijah (*Sliki 26 in 27*) je prikazano stanje po obnovi stabilizacijskega praga v drčo.



*Sliki 26 in 27: Gornjodolinski pogled na obnovljeno drčo; levo in dolvodni pogled na strugo; desno (osebni arhiv, 2021)*  
*Figure 26 and 27: Upstream view of a renovated stepped weir; left and Downstream view of a stream Kamniška Bistrica; right (personal archive, 2021).*

#### 7.4 Izdelava hidravličnega modela

Za izdelavo hidravličnega modela je bil uporabljen računalniški program Hec-Ras 6.0. Program omogoča uporabniku, da modelira eno dimenzionalni (1D) stalni tok, kombiniran 1D/2D nestalni tok ter 2D tok, transport sedimentov v strugi vodotoka in izvede kakovost vode. Za namen magistrske naloge smo torej obravnavali 1D in 2D, pri čemer je bil v 1D izračunu upoštevan stalni tok, pri 2D pa nestalni tok. Potek izdelave hidravličnega modela je razložen v nadaljevanju. Za lažje obdelovanje vhodnih podatkov in tudi rezultatov, smo izvedli dva ločena modela, kjer smo v enem obravnavali le 1D tok, v drugem pa 2D tok.

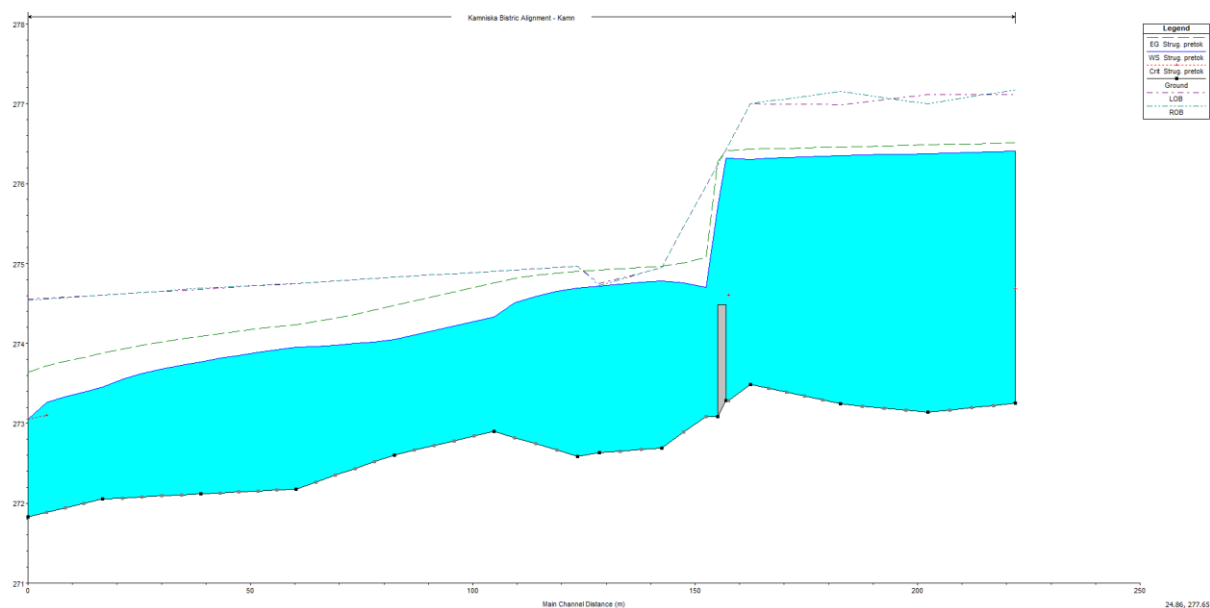
Za namen magistrske naloge smo v omenjenem računalniškem programu zaradi manj kompleksnega in s tem pravilnejšega upoštevanja hidravličnih razmer na prečnem objektu, katerega vpliv odstranitve smo analizirali, drčo upoštevali kot široki prag. Opis hidravličnih razmer vzdolž hrapave drče je namreč zelo zahteven, posledično je tovrstne objekte zelo težko verodostojno hidravlično obravnavati v hidravličnih modelnih orodjih brez dodatnih terenskih podatkov o gladinskih stanjih pri različnih pretokih. Omenjeni prag smo upoštevali na isti lokaciji, kjer je bila drča in z enako višino. Na ta način smo z vidika



gladinskih stanj in hidravličnih razmer gorvodno in dolvodno od prečnega objekta pridobili rezultate primerljive z dejansko situacijo.

#### 7.4.1 1D model

Najprej je bil izdelan 1D model obravnavanega odseka struge Kamniške Bistrice, pri čemer smo v programu upoštevali široki prag s prilagojenim prelivnim koeficientom (Slika 28). Na obravnavanem odseku smo imeli na razpolago 13 prečnih prereзов, zato smo interpolirali dodatne prečne profile, kjer smo upoštevali največjo razdaljo med njimi 5 m. Potrebno je omeniti, da interpolirani prečni profili predstavljajo le predviden potek struge vodotoka, ki ga predvideva program na podlagi interpolirane geometrije rečne struge. Slabost interpoliranih podatkov je ta, da ne prikažejo dejanskega poteka struge vodotoka, tako lahko prihaja do manjših odstopanj pri rezultatih. Pri izračunih smo upoštevali strugotvorni pretok na obravnavanem odseku, ki je bil na podlagi hidravličnih izračunov ocenjen na 105 m<sup>3</sup>/s, ki se približa 2-5 letni povratni dobi merjeno na vodomerni postaji Vir. Za izračun stalnega toka smo upoštevali mešani režim toka, kjer smo za gorvodni pogoj definirali kritično višino in za dolvodni pogoj normalna globina, kjer smo vnesli vzdolžni padec 0,006 m/m. Vrednosti Manningovega koeficienta  $n_g$  smo ocenili na 0,04 sm-1/3 za območje glavne struge, za del poplavnega območja vključenega v model je bila upoštevana vrednost 0,06 sm-1/3.



Slika 28: Vzdolžni profil obstoječega stanja s pragom pri strugotvornem pretoku.  
Figure 28: Longitudinal profile of the existing weir with a maximum flow.

#### 7.4.2 2D model

Za potrebe magistrskega dela je bil izdelan tudi 2D matematični numerični model obravnavanega območja (Slika 29). Za vzpostavitev hidravličnega modela so potrebni vhodni podatki o topografiji terena ter hidrološki podatki.



Slika 29: Prikaz območja obdelave (z modro).  
Figure 29: Display of the processing area (in blue).

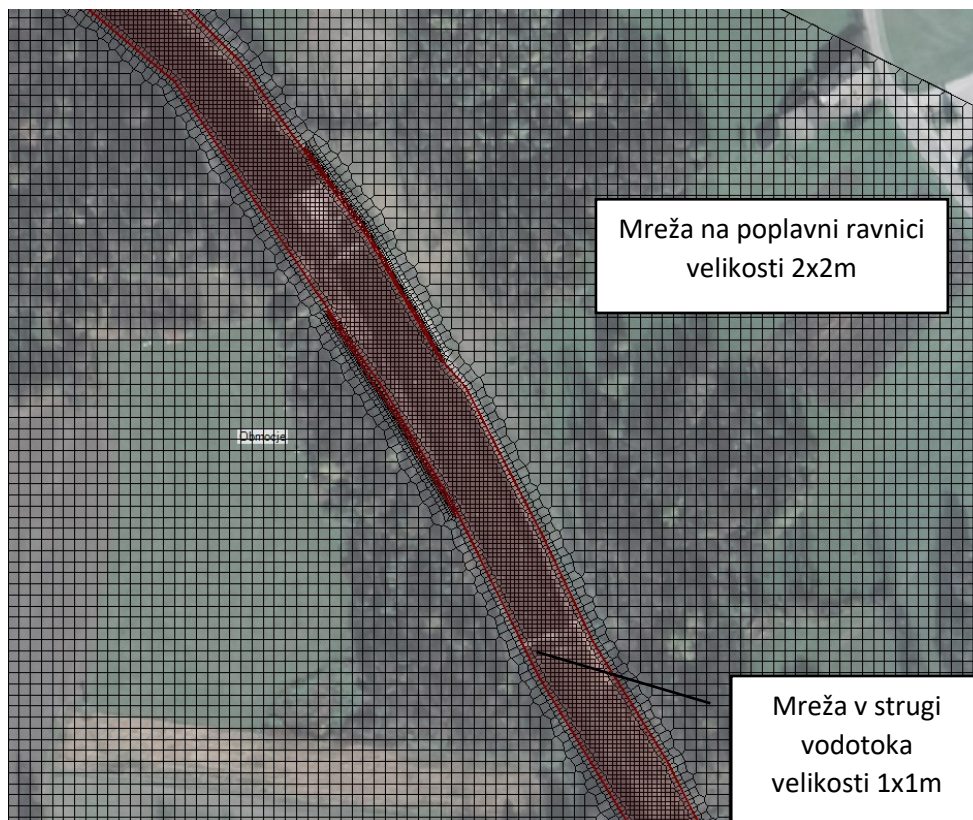
Osnova 2D matematičnega modela sta St. Venantovi enačbi gibalne količine in kontinuitete masnega toka v dvodimenzijski obliki. 2D enačbe se računajo po metodi končnih volumnov z Preissmannovo implicitno shemo, pri čemer model za shematizacijo uporablja tudi nestrukturirano mrežo različnih oblik. Za hidravlični model je glede na druge model značilen inovativen računski pristop, kjer na nivoju vsake posamezne računske celice program izračunava Q-H in V-H krivulje. Ker se te krivulje izračunavajo glede na vhodni digitalni model višin, v katerega so računske celice vgrajene, so posledično lahko računske celice večje od ostalih primerljivih programov, a s primerljivo ali celo boljšo natančnostjo upoštevanja geometrijskih oblik.

Topografija struge je bila posneta s klasično geodetsko izmero. Pri čemer je bila osnova geodetski posnetek stanja pred gradnjo drče oz. stanje s porušnim pragom. Tako je bilo posneto stanje po poružitvi pragi, kateri je bil porušen kar nekaj časa. Za izdelavo topografije terena izven struge pa smo uporabili Lidar podatke iz spletne strani Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO, portal evode.si). Uporabljen je oblak točk (OTR), ki se je na osnovi primerjave z geodetskim posnetkom zelo dobro ujemal.

Vrednosti Manningovega koeficienta  $n$  smo ocenili na 0,04  $\text{sm}^{-1/3}$  za območje glavne struge, za del poplavnega območja vključenega v model je bila upoštevana vrednost 0,06  $\text{sm}^{-1/3}$ .

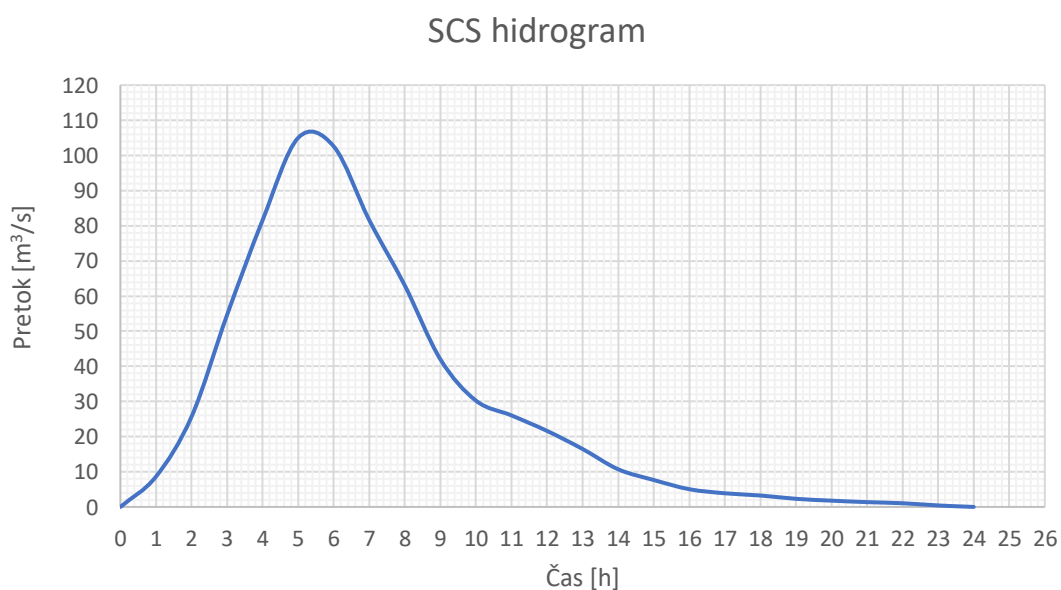
V ta namen je bil izdelan 2D hidravlični model, ki je vključeval 1100 m dolgi odsek struge Kamniške Bistrice. Hidravlični model je izdelan za obstoječe stanje, kjer je bil upoštevan prečni objekt (prag) v strugi in za predvideno stanje, po odstranitvi prečnega objekta iz struge vodotoka ob upoštevanju 1. scenarija preoblikovanja dna struge opisanega v nadaljevanju. V modelu smo uporabili ciljno zgoščevanje računske mreže (Slika 30) tako, da smo jo na določenih kritičnih predelih še dodatno zgostili (v sami strugi Kamniške Bistrice). Velikost celic na poplavnih predelih ne presega 2 m, v območju struge in ostalih zgostitev smo jo zmanjšali na 1 m oz. manj.





Slika 30: Prikaz zgoščene mreže za namen 2D modela.  
Figure 30: Display of a condensed grid for the purpose of a 2D model.

Pri izdelavi 2D modela smo za gorvodni robni pogoj definirali vtočni hidrogram, ki sledi splošni obliki SCS sintetičnega hidrograma (Slika 31), pri čemer je bila konica pretoka hidrograma enaka strugotvornemu oz. statistično izrednotenemu pretoku, pri dolvodnem robnem pogoju pa povprečni naklon dna struge, ki je znašala 0.006 m/m.



Slika 31: Hidrogram odtoka pri največjem strugotvornem pretoku.  
Figure 31: Outflow hydrograph at maximum flow in the stream.

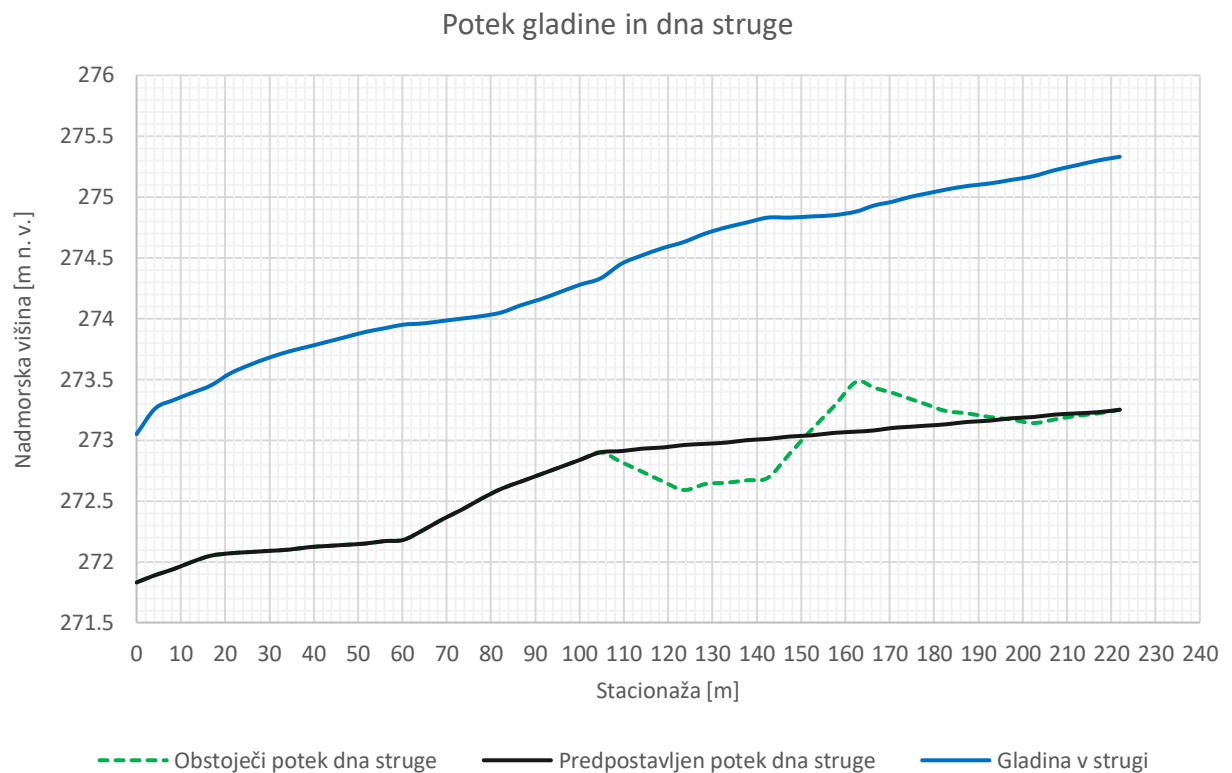
## 7.5 Predpostavljene vplivi spremembe poteka dna struge vodotoka v primeru odstranitve prečnega objekta

Na podlagi dosedanjih izvedenih analiz, ki so razpoložljive v zbrani literaturi (predstavljene v poglavju 6.4), smo predpostavili pet različnih scenarijev preoblikovanja struge vodotoka po odstranitvi prečnega objekta iz struge vodotoka. Glede na višino obravnavanega prečnega objekta je bilo v nekaterih raziskavah ugotovljeno, da je vpliv odstranitve objekta zaznan na razdalji cca 100 m gorvodno. V našem primeru smo predpostavili, da ima odstranitev praga tako dolvodno kot tudi gorvodno vpliv. Predpostavili smo različne dolžine vpliva, pri čemer smo za vpliv dolvodno predpostavili, da se zapolni erozijski tolmun, ki je razvit pod prečnim objektom. V predhodnem poglavju je opisano obstoječe stanje, iz katerega je razvidno, da se na obravnavanem odseku nahajata tako drča kot tudi prag. Za namen magistrske naloge smo upoštevali le odstranitev enega prečnega objekta in sicer drče, ki leži gorvodno od praga. V tem poglavju so opisane spremembe vodotoka, pod rezultati so nazorno prikazani grafi s potekom gladin in struge. V nadaljevanju sledi opis različnih upoštevanih scenarijev preoblikovanja struge. Pri izračunih hidravličnega modela smo upoštevali ocenjeni strugotvorni pretok Kamniške Bistrice na obravnavanem odseku, ki znaša  $105 \text{ m}^3/\text{s}$ , pretok  $Q_{10}$  je ocenjen na  $168 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Predpostavljene dolžine odsekov znotraj katerih se vpliv odstranitve objekta širi gorvodno in dolvodno so prilagojene lokalni geometriji dna in prečnega prereza struge, tako da smo dobili prehod v sorazmerno zvezen potek dna struge, kakršnega naj bi se pričakovalo po sukcesijskem preoblikovanju poteka dna struge ob odstranitvi pragu.

### 1. scenarij

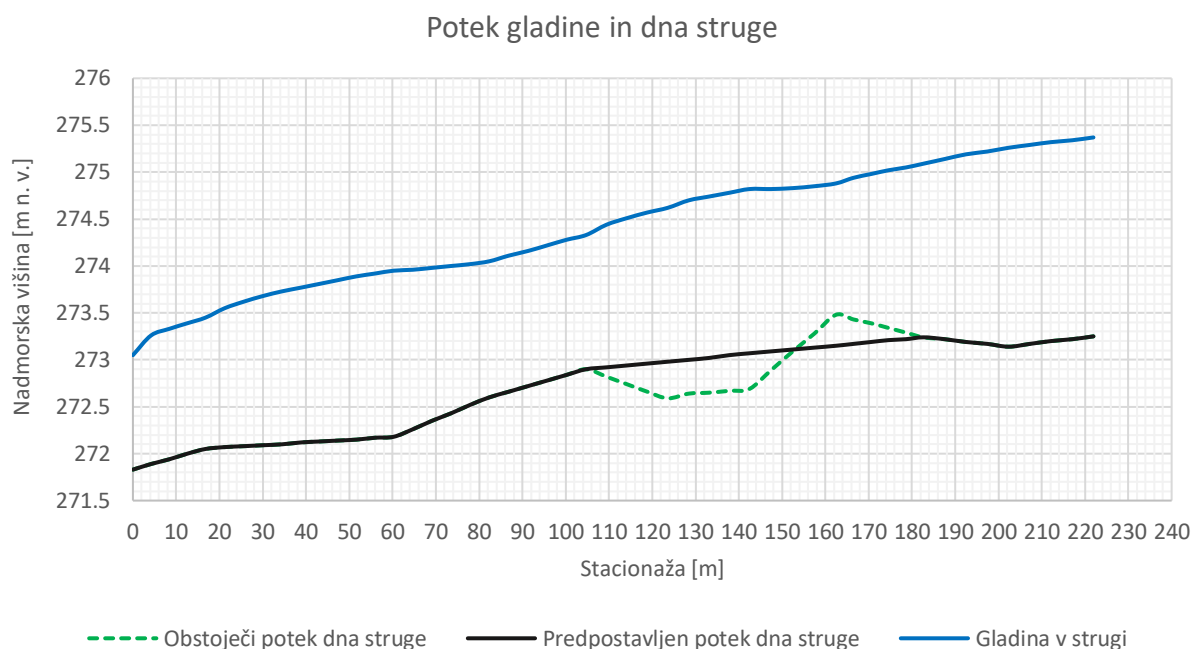
Za prvi scenarij (*Slika 32*) spremembe vodotoka smo predpostavili, da vpliv erodiranja vpliva 65 m gorvodno in 60 m dolvodno od točke odstranitve objekta iz struge vodotoka. Na tem odseku se spremeni padec nivele na  $0,003 \text{ m/m}$ , medtem ko je dolvodno še vedno ohranjen padec  $0,01 \text{ m/m}$ .



Slika 32: Vzdolžni profil predvidenega stanja za prvi scenarij.  
*Figure 32: Longitudinal profile of the predicted condition for the first possibility.*

## 2. scenarij

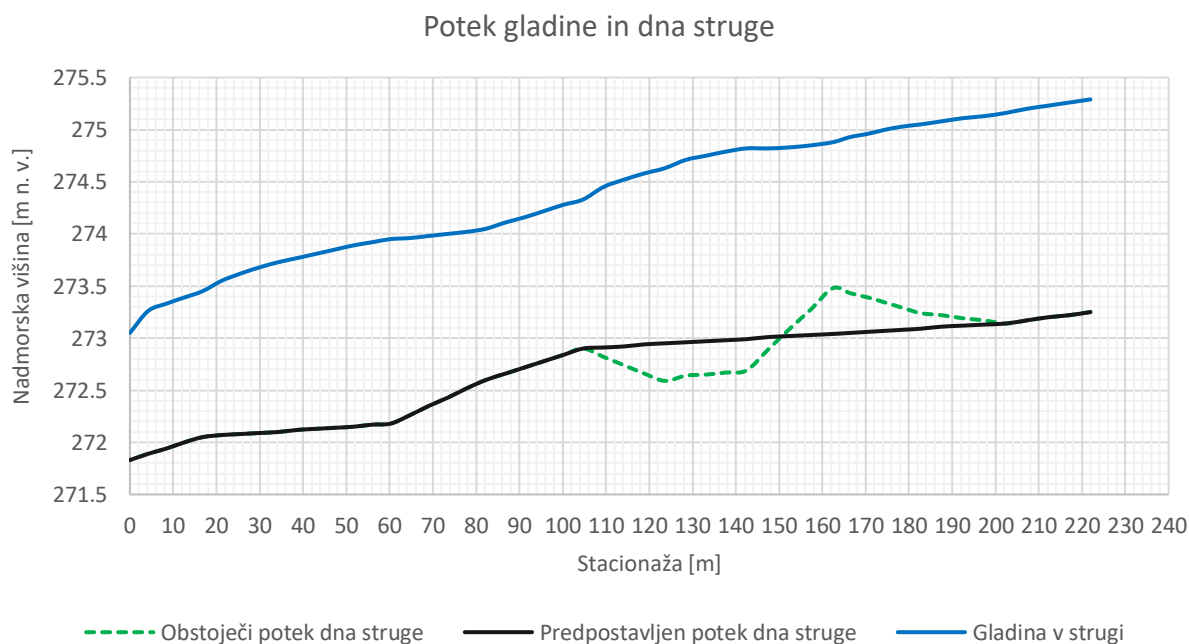
Za drugi scenarij (Slika 33) spremembe vodotoka smo predpostavili, da vpliv erodiranja vpliva cca 25 m gorvodno in 60 m dolvodno od točke odstranitve objekta iz struge vodotoka. Na tem odseku se spremeni padec nivelete na 0,0044 m/m, medtem ko je dolvodno še vedno ohranjen padec 0,01 m/m.



Slika 33: Vzdolžni profil predvidenega stanja za drugi scenarij.  
Figure 33: Longitudinal profile of the predicted condition for the second possibility.

### 3. scenarij

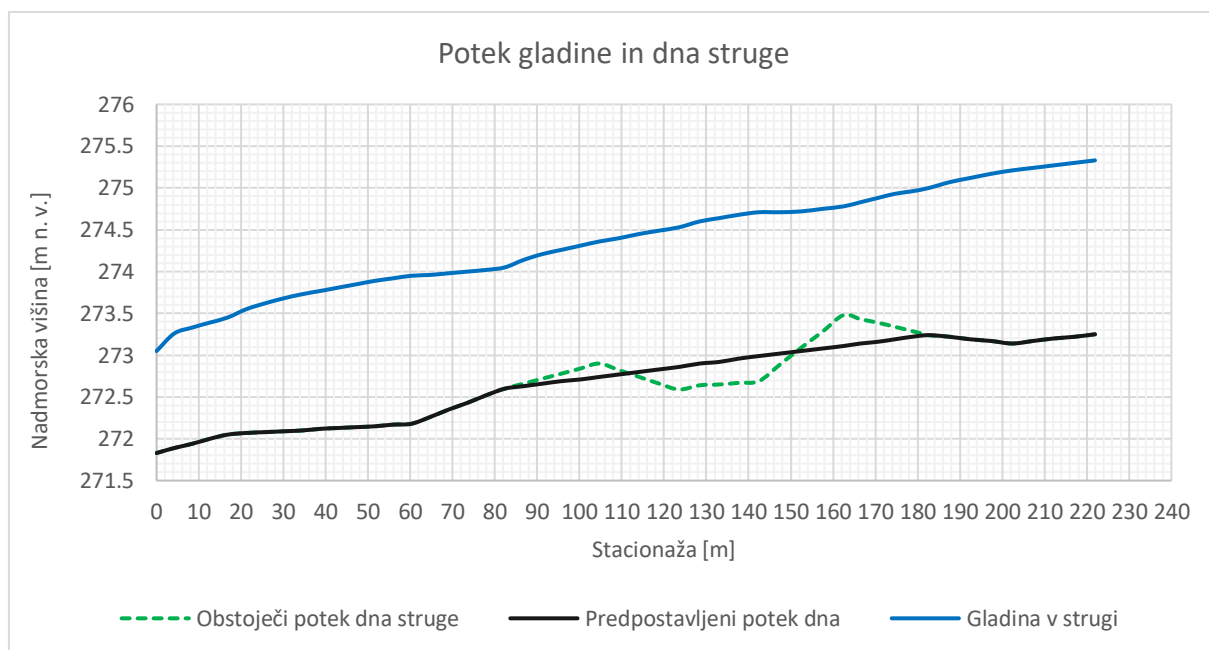
Za tretji scenarij (Slika 34) spremembe vodotoka smo predpostavili, da vpliv erodiranja vpliva cca 45 m gorvodno in 60 m dolvodno od točke odstranitve objekta iz struge vodotoka. Na tem odseku se spremeni padeč nivoje na 0,0025 m/m, medtem ko je dolvodno še vedno ohranjen padeč 0,01 m/m.



Slika 34: Vzdolžni profil predvidenega stanja za tretji scenarij.  
Figure 34: Longitudinal profile of the predicted condition for the third possibility.

#### 4. scenarij

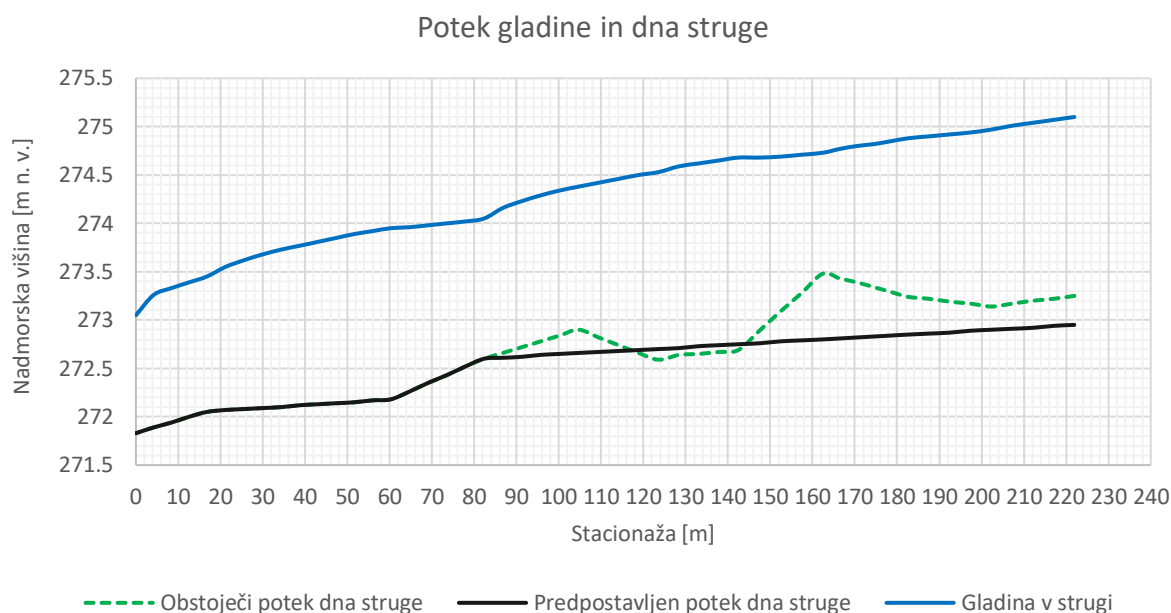
Za četrti scenarij (Slika 35) spremembe vodotoka smo predpostavili, da vpliv erodiranja vpliva cca 25 m gorvodno in 100 m dolvodno od točke odstranitve objekta iz struge vodotoka. Na tem odseku se spremeni padec nivelete na 0,0064 m/m, medtem ko je dolvodno še vedno ohranjen padec 0,01 m/m.



Slika 35: Vzdolžni profil predvidenega stanja za četrti scenarij.  
Figure 35: Longitudinal profile of the predicted condition for the fourth possibility.

#### 5. scenarij

Za peti scenarij (Slika 36) spremembe vodotoka smo predpostavili, da vpliv erodiranja vpliva 100 m gorvodno in 100 m dolvodno od točke odstranitve objekta iz struge vodotoka. Na tem odseku se spremeni padec nivelete na 0,0025 m/m, medtem ko je dolvodno še vedno visok padec 0,01 m/m.



Slika 36: Vzdolžni profil predvidenega stanja za peti scenarij.  
Figure 36: Longitudinal profile of the predicted condition for the fifth possibility.

## 8 REZULTATI, ANALIZA IN KONČNE UGOTOVITVE

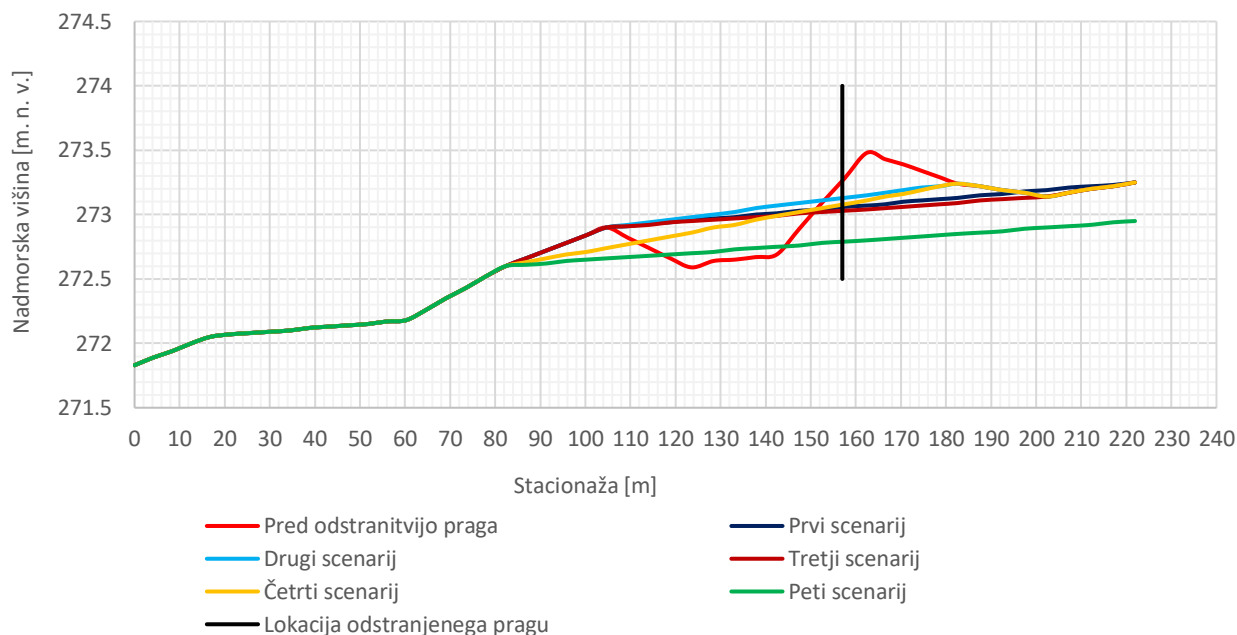
Za lažjo primerjavo razlik med obstoječim in predpostavljenim stanjem po odstranitvi objekta, smo na enem grafičnem prikazu prikazali primerjavo hidravličnih razmer v primeru obstoječega stanja (prisotnost pragu) in v primeru različnih upoštevanih scenarijev preoblikovanja dna struge po odstranitvi prečnega objekta.

### 8.1 Rezultati izračunov z uporabo 1D modela struge

Med seboj smo primerjali razlike v hidravličnih razmerah z vidika poteka gladin, strižnih napetosti, Froudevega števila in pretočnih hitrosti.

Na spodnjem grafu (Slika 37) je prikazana primerjava različnih scenarijev glede na potek dna struge vodotoka. Prikazanih je vseh pet scenarijev, prav tako pa tudi stanje pred samo odstranitvijo objekta iz struge vodotoka (rdeča črta). Predpostavljen je verjeten scenarij, katerega pogosto omenjajo tudi v literaturi, in sicer da se dolvodno od pragu erozijski tolmun in podslapje zapolnita s plavinami. Pričakuje se, da se bo zajeda, ki nastane po odstranitvi praga, širila gorvodno (vpliv tako imenovane zadensjska oz. retrogradne erozije). Izhajali smo iz predpostavke, da se po določenem času vzdolž obravnavanega odseka vzpostavi nov ravnovesni (sorazmerno enakomeren) potek dna struge vodotoka. Iz poteka terena je razvidno, da prva (temno modra črta) in tretja (rjava črta) predpostavljena scenarija prikazujeta zelo podoben potek terena, tako med njima ni pričakovati večjih razlik. Ocenjujemo, da je peti scenarij, ki predvideva najobsežnejšo poglobitev dna struge manj verjeten, premeščen material bi se odlagal nekoliko bolj dolvodno, kar pa v tem scenariju na dolvodnem odseku ni bilo upoštevano kot morebitna sprememba dna.

### Primerjava različnih scenarijev glede na potek dna struge vodotoka

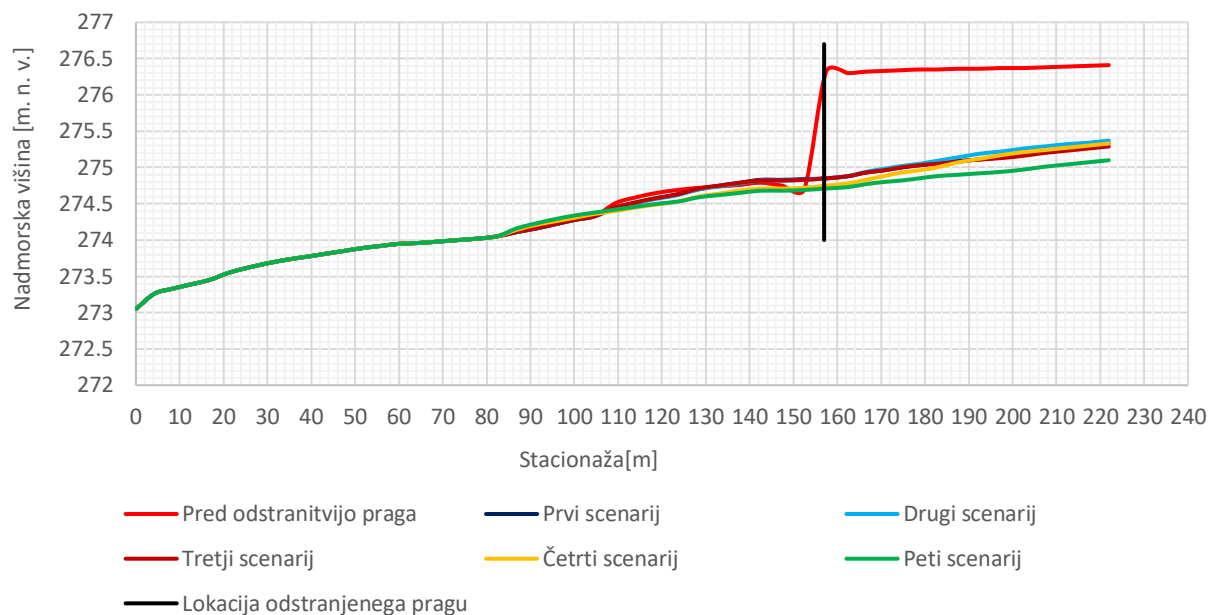


Slika 37: Grafični prikaz spremembe v poteku dna vodotoka.  
Figure 37: Graphic representation of the channel bottom change along the studied section.

Iz izračunanih gladinskih stanj (Slika 38) lahko sklepamo, da bi imela odstranitev objekta velik vpliv na potek gladine. Predvsem se spremeni gladina gorvodno od objekta. Pri izdelavi 1D modela smo bili zaradi omejenih razpoložljivih geodetskih podatkov o prečnih prerezi struge nekoliko omejeni z dolžino obravnavanega odseka, zato ni razvidno kakšen vpliv bi imel takšen potek gladin še bolj gorvodno. Prav tako iz samega modela izgleda, da je to bil jez z akumulacijo. Gorvodno je bilo dno namreč poravnano s krono jezu. Vendar, pa je bila geodezija narejena za porušeno stanje in tako ni bilo podatka za gorvodno nivoletno.

Na spodnjem grafu je prikazan potek gladin za vsak scenarij pri upoštevanem strugotvornem pretoku. Poteki gladin so pričakovani in so si med seboj precej podobni. Rdeča črta prikazuje gladino, ko je v strugi prisoten prag. Iz tega je razvidno, da se nad pragom pojavi zajeza, ki je glede na rezultate hidravličnih izračunov pribl. 1,7 m višja od gladine vode neposredno dolvodno od pragu. Po odstranitvi objekta se gladina na gorvodnem odseku (torej nad pragom) zniža do 1 m in ima enakomeren padec vzdolž celotnega obravnavanega odseka struge. Največja razlika med predpostavljenimi scenariji je med drugim in petim scenarijem. V tem primeru je razlika približno 30 cm. Med ostalimi scenariji je razlika v gladini v rangi nekaj centimetrov.

### Primerjava različnih scenarijev glede na gladino vode

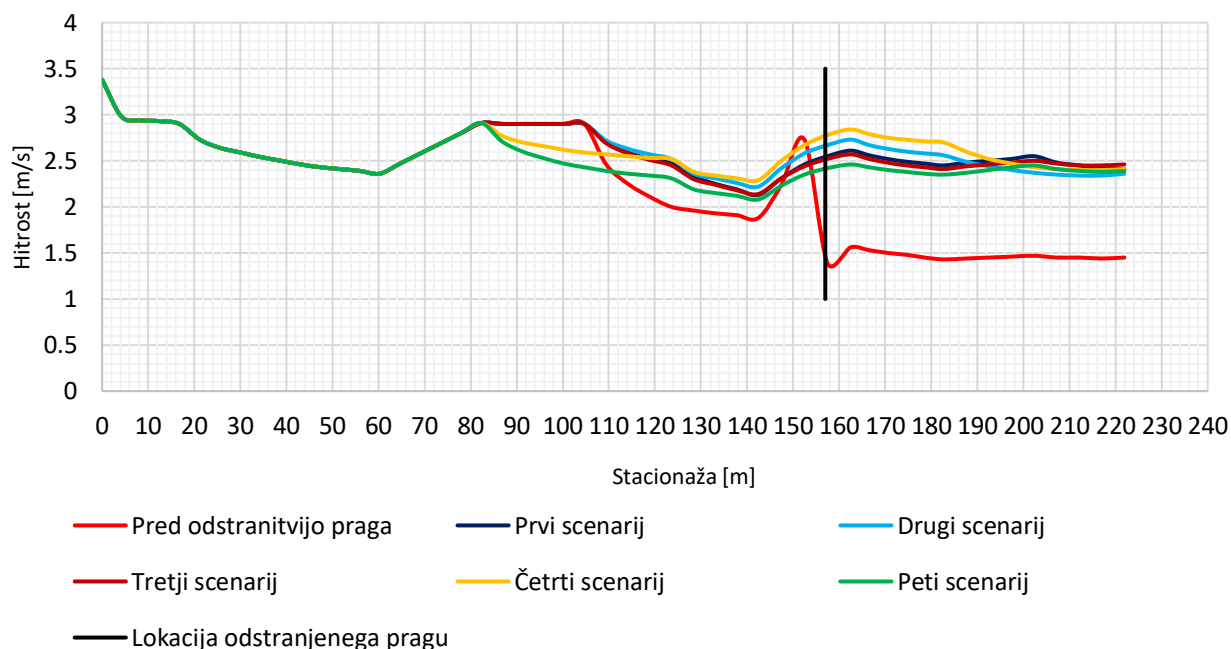


Slika 38: Grafični prikaz spremembe poteka gladin vodotoka.  
Figure 38: Graphic representation of the water elevation change along the studied section.

Nadalje smo izvedli primerjavo pretočnih hitrosti pri upoštevanju različnih scenarijev. Na spodnjem grafu (Slika 39) so prikazani rezultati za pretočne hitrosti, ki so tesno povezane s strižnimi napetostmi, katerih izračunane vrednosti so predstavljene na grafu nižje (Slika 40). Porazdelitev pretočnih hitrosti v vzdolžnem prerezu je podobna porazdelitvi strižnih napetosti. Večja kot je hitrost v strugi vodotoka, večja bo posledično strižna napetost vodnega toka ter večji premeri zrn plavin se bodo transportirali po strugi vodotoka. Največja hitrost (cca 2,7 m/s) v obstoječem stanju, je zaznati tik pod pragom. Gorvodno od pragu so vrednosti pretočnih hitrosti okoli 1,5 m/s. Takšen potek hitrosti je pričakovan. Po odstranitvi prečnega objekta odstranimo oviro v strugi in hitrosti so precej enakomerne vzdolž celotnega obravnavanega odseka. Torej se po 1. scenariju hitrosti gorvodno od objekta povečajo za ca. 1 m/s. Pretočne hitrost okoli 2,5 m/s se bolj ali manj ohranjajo skozi celoten obravnavani odsek.

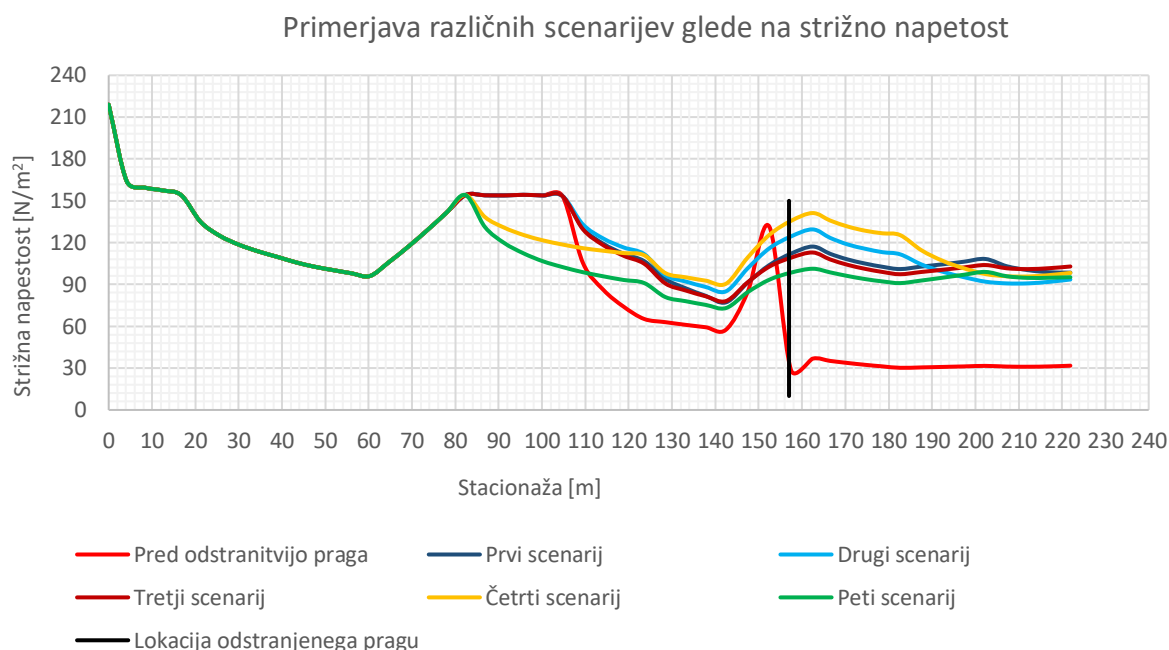


### Primerjava različnih scenarijev glede na pretočno hitrost



Slika 39: Grafični prikaz spremembe pretočne hitrosti v vodotoku.  
Figure 39: Graphic representation of the flow velocity change along the studied section.

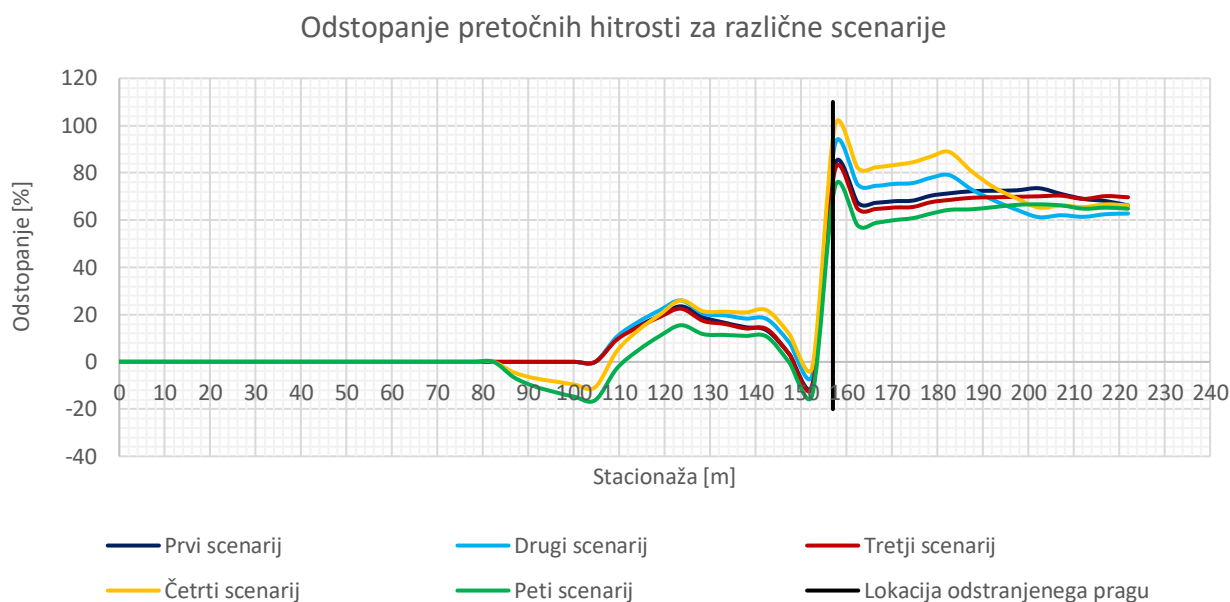
Na spodnjem grafu (Slika 40) so prikazani rezultati izračunanih strižnih napetosti pri upoštevanju različnih scenarijev. Iz grafa je razvidno, da se strižne napetosti kar precej razlikujejo med posameznimi scenariji. Na podlagi teh izračunov bi lahko sklepali, da je zelo težko napovedati, na kakšen način se bo dejansko preoblikovala struga vodotoka po odstranitvi objekta, lahko pa razberemo osnovne lastnosti pričakovanih sprememb hidravličnih razmer. Pred odstranitvijo prečnega objekta je strižna napetost gorvodno nad objektom manjša od vrednosti dolvodno od objekta. Ugotovimo lahko, da je spremenljivost pretočnih hitrosti vzdolž obravnavanega odseka podobna spremenljivosti pretočnih hitrosti. Največja strižna napetost ( $135 \text{ N/m}^2$ ) za obstoječe stanje, je zaznati tik pod pragom. Gorvodno od pragu so le te manjše in sicer v velikosti do  $30 \text{ N/m}^2$ . Po odstranitvi prečnega objekta, je spremenljivost vrednosti strižnih napetosti vzdolž obravnavanega odseka manjša. V primeru 1. scenarija se strižne napetosti gorvodno od objekta povečajo za cca  $60 \text{ N/m}^2$ . Zanimivo je, da se med posameznimi scenariji tik gorvodno od pragu, strižne napetosti kar precej razlikujejo. Iz spodnjega grafa je torej razvidno, da je v tem primeru največja razlika med četrtem in petim scenarijem (pribl.  $40 \text{ N/m}^2$ ).



Slika 40: Grafični prikaz spremembe strižne napetosti v vodotoku.  
Figure 40: Graphic representation of the shear stress change along the studied section.

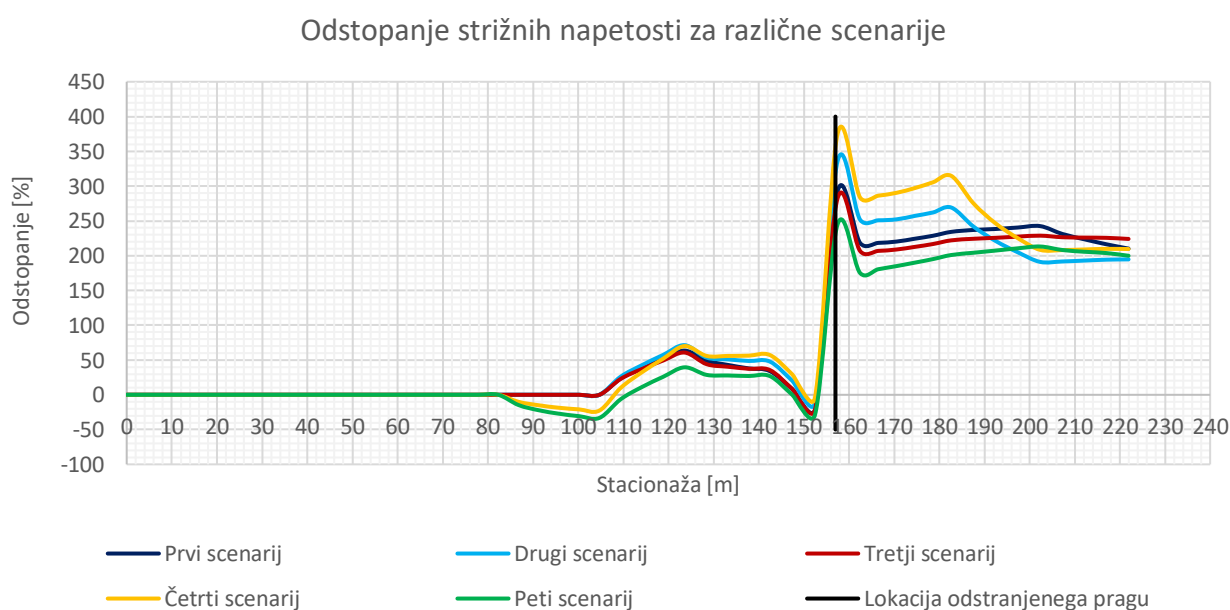
S pomočjo Shieldsovega diagrama lahko na podlagi strižne napetosti določimo kritične premere plavin. Dobljeni premeri so mejni premeri, kar pomeni, da če so zrna manjša od teh, obstaja velika verjetnost, da se bodo premeščala. Za vsak scenarij posebej so bila zaznana različna odstopanja. Za scenarij, ko je bil v strugi upoštevan prag, smo s pomočjo diagrama določili kritični premer plavin velikosti 4 cm in sicer gorvodno od objekta, ter 14 cm dolvodno od objekta. Po odstranitvi prečnega objekta se kritični premeri plavin, gorvodno od objekta, povišajo za do 15 cm za četrti scenarij in 11 cm za peti scenarij (gledano na isti stacionaži). Na dolvodni lokaciji je ta razlika manjša in sicer znaša kritično zrno plavin do 5 cm. Prečni objekt v vodotoku povzroča zaježbo, katera omejuje dolvodno premeščanje plavin, tako se nad objektom intenzivneje odlagajo bolj drobnostne plavine.

Za lažjo predstavbo dobljenih rezultatov smo na spodnjih dveh grafih (*Slika 41* in *Slika 42*) prikazali relativno odstopanje hitrosti in strižnih napetosti od obstoječega stanja z upoštevanim pragom. Za vsak scenarij posebej prikazujemo odstopanje od obstoječega stanja. Na grafu je torej obstoječe stanje upoštevano kot ravna črta pri vrednosti 0 na x-osi, kar predstavlja naše primerjalno izhodišče.



Slika 41: Grafični prikaz spremembe pretočne hitrosti v vodotoku.  
Figure 41: Graphic representation of the change in the course for the flow velocity.

Iz zgornjega grafa je razvidno, da je doseženo od 80% do 100% povečanje pretočnih hitrosti za posamezen scenarij, neposredno gorvodno od pragu. Pri nekaterih scenarijih dobimo negativna odstopanja, kar pomeni manjše vrednosti v primerjavi z obstoječim stanjem. Pozitivne vrednosti odstopanj nakazujejo, da se bodo v teh primerih plavine na teh lokacijah zelo verjetno premeščali dolvodno. V nasprotnem primeru, kjer je odstopanje negativno, lahko pričakujemo odlaganja materiala v strugi vodotoka, vendar je le to v dosti manjšem obsegu, kot za primer pričakovanega premeščanja. Negativna odstopanja so opažena predvsem na območju erozijskega tolmana.



Slika 42: Grafični prikaz spremembe strižne napetosti v vodotoku.  
Figure 42: Graphic representation of the change in the course for the shear stress.

Tako kot za primer odstopanja hitrosti v strugi vodotoka, smo prikazali tudi odstopanja strižnih napetosti za vsak scenarij posebej, kar prikazuje *Slika 42*. Iz tega je razvidno, da so odstopanja v tem primeru povečajo tudi do 400%, merjeno gorvodno pred pragom. Lokacije odstopanj se pričakovano ujemajo z lokacijami odstopanj pretočnih hitrosti, vendar so relativne spremembe strižnih napetosti bistveno večje.

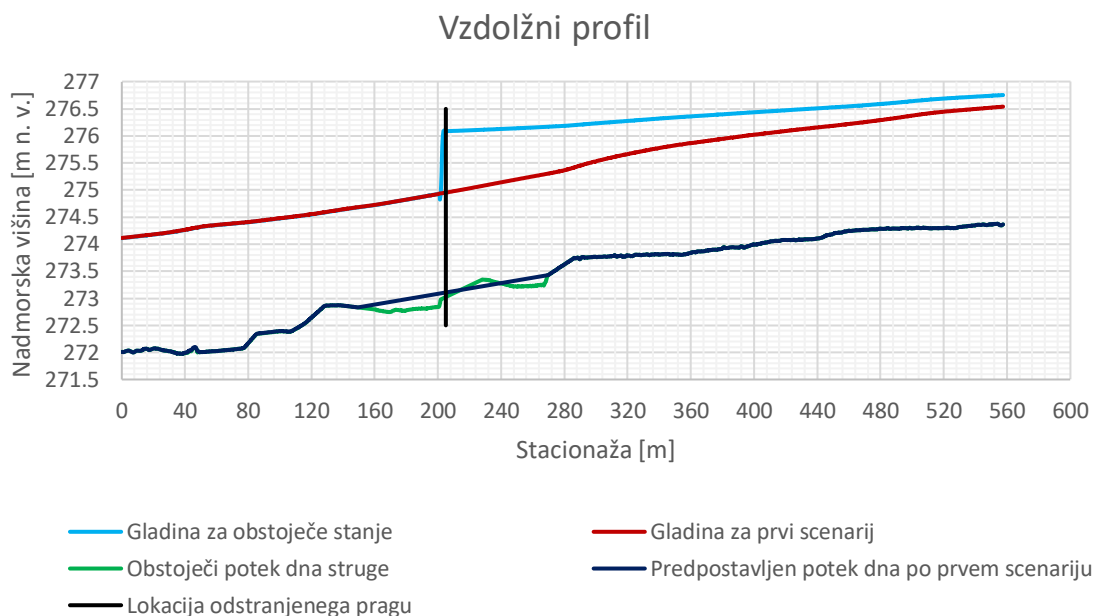
Vzdolž celotnega odseka se sicer glede na rezultate hidravličnih izračunov ohranja mirni režim toka. Okvirne vrednosti Froudovega števila tako znašajo med 0,6 in 0,7, v neposredni okolici praga pa dosežejo vrednost 0,8.

## 8.2 Rezultati izračunov z uporabo 2D modela struge

Pri 2D modelu smo upoštevali obstoječe stanje (z upoštevanim prečnim objektom), in za 1. predpostavljeni scenarij preoblikovanja struge vodotoka po odstranitvi prečnega objekta. Rezultati so predstavljeni v nadaljevanju. Pri 2D modelu smo upoštevali daljši odsek, za katerega smo uporabili razpoložljive Lidar podatke, zato je boljše razvidno, kakšen vpliv imajo spremembe na gorvodne in dolvodne razmere.

Na grafu (*Slika 43*) je prikazan vzdolžni profil struge vodotoka, kjer zelena črta prikazuje potek dna struge pred odstranitvijo objekta. Svetlo modra črta prikazuje potek gladine pri strugotvornem pretoku za obstoječe stanje. Temnomodra črta na grafu, prikazuje predpostavljeno spremembo poteka dna struge vodotoka s pripadajočim potekom gladine (rdeča črta).

Iz tega grafa je razvidno, da smo predpostavili spremembo v strugi vodotoka le v okolici prečnega objekta in je enaka kot v 1D modelu (tako geometrija struge kot sam prag). Primerjava med gladinama kaže, da ima sama sprememba geometrije struge sorazmerno velik vpliv na spremembo gladine. Gladina se gorvodno od objekta (v primeru odstranitve objekta) zniža za pribl. 2,0 m. Poteki gladin pri upoštevanem prečnem objektu so primerljivi z rezultati dobljenimi v 1D modelu. Svetlomodra črta, ki prikazuje obstoječe stanje, se dobro ujema s potekom gladine pri 1D modelu. Sama gladina pa se ne spremeni le na območju spremenjenega poteka dna struge, ampak vpliv seže tudi gorvodno ter tudi dolvodno. V primeru upoštevanja 1. scenarija je potek gladine enakomeren in sledi predpostavljenemu naklonu dna struge ter se ujema s potekom gladine v 1D modelu.



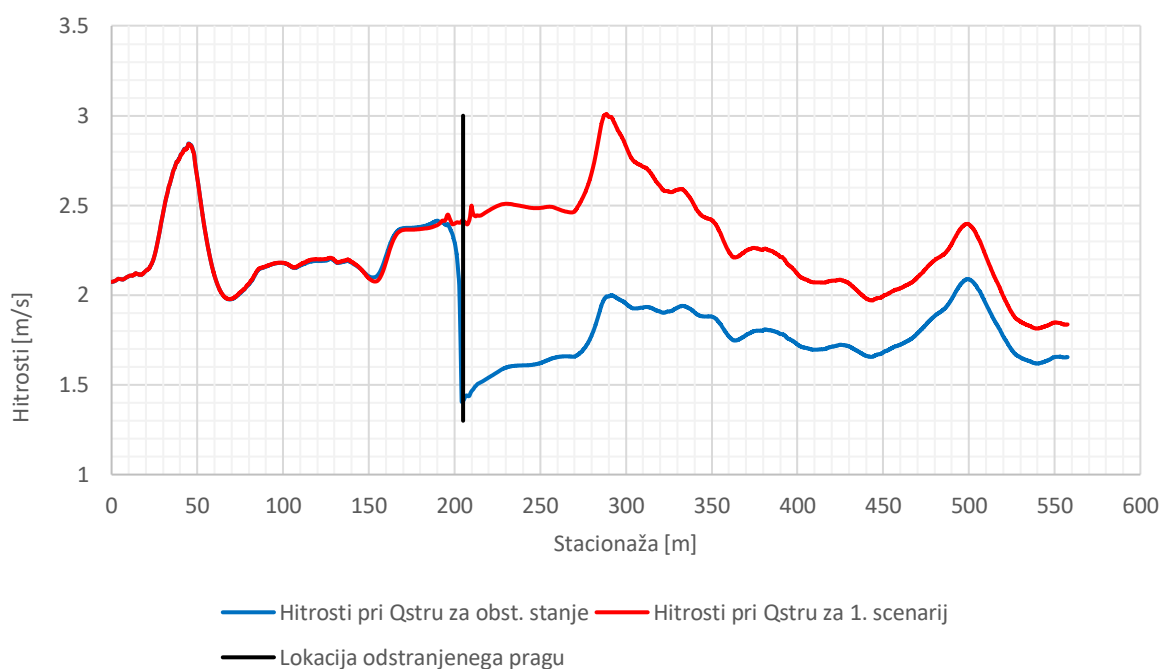
Slika 43: Vz dolžni profil gladine in terena pri pretoku  $Q_{stru}$ .  
Figure 43: Graphic representation of the water elevation change along the studied section.

Na spodnji sliki (Slika 44) je v situaciji prikazana primerjava gladin med obstoječim stanjem in predpostavljenim prvim scenarijem. Zelena barva prikazuje območje, kjer pride do znižanja gladin, na ostalih območjih so spremembe v nivojih gladin zelo majhne in jih lahko izpustimo. V našem primeru, kjer primerjamo razmere pri obstoječem stanju (s pragom) in po predpostavljenem scenariju odstranitve pragu in preoblikovanja dna struge, se gladina v sami strugi zniža, zato je razvidno zeleno obarvanje odseka struge gorvodno od praga. Sam vpliv spremembe odstranitve praga ima precejšen gorvodni vpliv na odseku dolžine cca 200 m. Dolvodno od praga ni več zaznati nikakršnih razlik v gladini vode, zato je ta odsek obarvan le z belo barvo.



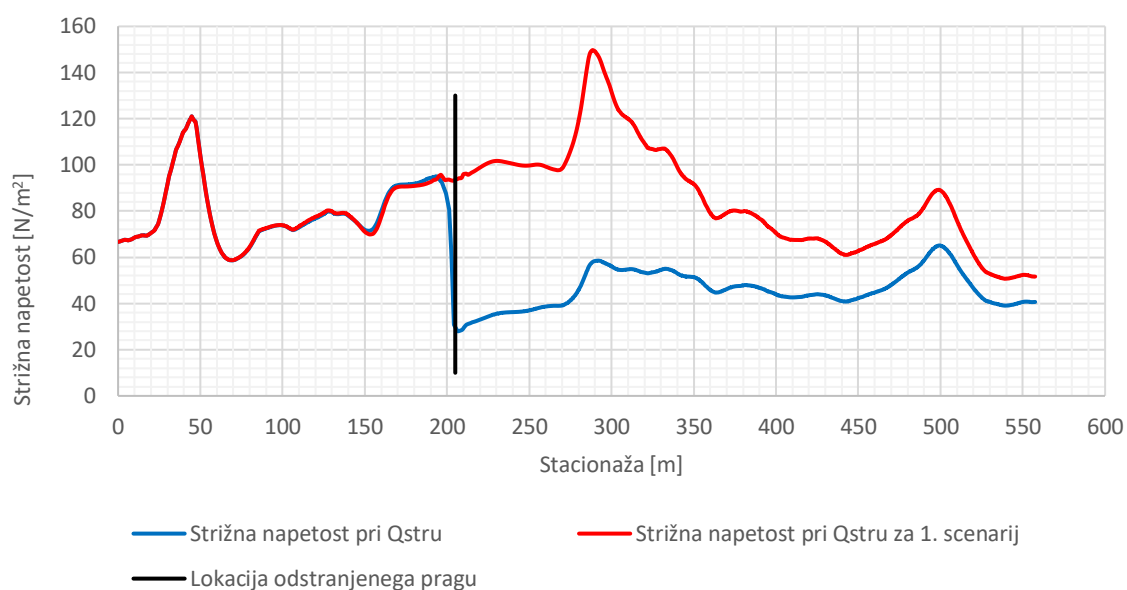
Slika 44: Prikaz razlike gladin med obstoječim stanjem in predpostavljenim prvim scenarijem.  
Figure 44: The difference in WSE between existing situation and the first scenario.

Na drugem grafu (Slika 45) je prikazan vzdolžni profil spremembe hitrosti v strugi vodotoka. Rdeča črta prikazuje rezultate po 1. predpostavljene scenariju, modra črta pa prikazuje spremembe hitrosti vzdolž obravnavanega odseka za stanje pred odstranitvijo objekta iz struge vodotoka. Hitrosti se najbolj spremenijo prav na območju odstranitve prečnega objekta. Najvišja dosežena pretočna hitrost (do 3 m/s) v 1. scenariju je dosežena na stacionaži 270 m, medtem ko je v obstoječem stanju na približno isti lokaciji hitrost le do 2 m/s. V primerjavi z rezultati izračunov 1D modela lahko ugotovimo, da, so izračunane pretočne hitrosti nekoliko višje. V splošnem so vzdolž obravnavanega odseka v 2D in 1D modelu so v splošnem pretočne hitrosti med seboj primerljive. Vendar pa vpliv spremembe seže predvsem gorvodno, medtem ko dolvodno ni zaznati nikakršnih razlik.



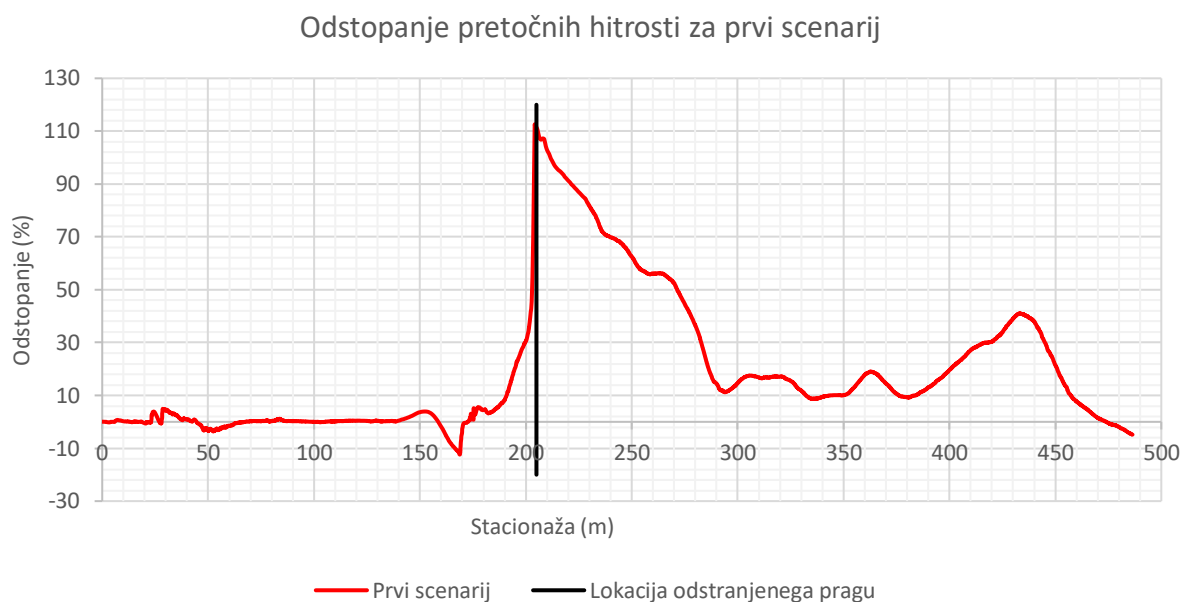
Slika 45: Vzdolžni profil pretočne hitrosti pri pretoku  $Q_{stru}$ ; 2D model.  
Figure 45: Graphic representation of the flow velocity change along the studied section.; 2D model.

Na spodnjem grafu (Slika 46) sta prikazana poteka strižnih napetosti, kjer rdeča črta ponazarja rezultate za 1. predpostavljene scenarij po odstranitvi objekta, modra črta pa prikazuje potek strižnih napetosti, ko se v vodotoku nahaja prečni objekt. Sam potek grafa je podoben kot v primeru pretočnih hitrosti. Kot smo omenili že v predhodnem poglavju sta lokacijsko pretočna hitrost in strižna napetost med seboj tesno povezani. V tem primeru je med obema scenarijema manjša razlika kot pri hitrosti. Najvišja dosežena strižna napetost (do 150 N/m<sup>2</sup>) v 1. scenariju je dosežena na stacionaži pribl. 270 m. Torej na isti stacionaži, kot je bila dosežena največja pretočna hitrosti. V obstoječem stanju je na pribl. isti stacionaži strižna napetost le 60 N/m<sup>2</sup>. V primerjavi z 1D modelom, so v 2D izračunu strižne napetosti nekoliko višje. Vzdolž obravnavanega odseka v 2D in 1D modelu so v splošnem strižne napetosti med seboj primerljive, enako kot pri hitrostih. Ugotovimo lahko, da vpliv spremembe seže predvsem gorvodno, medtem ko dolvodno ni zaznati bistvenih razlik.



Slika 46: Vzdolžni profil strižne napetosti pri pretoku  $Q_{stru}$ ; 2D model.  
Figure 46: Graphic representation of the shear stress change along the studied section.

Tudi za 2D model smo prikazali relativna odstopanja za pretočne hitrosti in strižne napetosti. Na grafu je torej obstoječe stanje upoštevano kot ravna črta pri vrednosti 0 na x-osi, kar predstavlja naše primerjalno izhodišče. Na spodnjem grafu (Slika 47) je razvidno kolikšne so relativne razlike pretočnih hitrosti med obstoječim stanjem (z upoštevanim pragom) in stanjem 1. predvidenega scenarija. V tem primeru je razvidno, da največje povišanje znaša do 110% in sicer na isti lokaciji, kot se je nahajal prečni objekt. V kolikor primerjamo s Slika 41 (na kateri so predstavljeni rezultati za 1D model), ugotovimo, da so v tistem primeru največja odstopanja za 1. scenarij okoli 90%, torej je ujemanje dejansko zelo dobro. Vzrok za samo odstopanje je najverjetneje v nezmožnosti upoštevanja identičnih geometrijskih lastnosti struge v primeru 1D in 2D izračuna. Še dodaten razlog za razlike je dejstvo, da so v 2D modelu prikazani rezultati vzdolž črte nekje na sredini struge (približno v sami matici toka), v 1D modelu pa so rezultati povprečni za celotni prečni prerez.



Slika 47: Vzdolžni profil pretočnih hitrosti pri pretoku  $Q_{\text{stru}}$ ; 2D model.  
Figure 47: Graphic representation of the change in the course for the flow velocity.

Spodnji graf (Slika 48) prikazuje odstopanje strižnih napetosti. V tem primeru je razvidno, da so odstopanja višja kot pri pretočnih hitrostih. Največje povišanje znaša do 400% na isti lokaciji kot je bila zabeleženo največje odstopanje hitrosti, tam kjer se je nahajal prečni objekt v strugi. Tekom struge gorvodno se odstopanje manjša, in sicer se na dolžni približno 100 m le ta zniža na le 20-30% spremembo v primerjavi z obstoječim stanjem. Lokacije odstopanj se pričakovano ujemajo z lokacijami odstopanj pretočnih hitrosti, vendar so relativne spremembe strižnih napetosti bistveno večje, podobno smo lahko opazili tudi v primeru 1D izračuna.



Slika 48: Vzdolžni profil strižne napetosti pri pretoku  $Q_{\text{stru}}$ ; 2D model.  
Figure 48: Graphic representation of the change in the course for the shear stress; 2D model.



### 8.3 Končne ugotovitve

Rezultati za 1D model in 2D model so si med seboj primerljivi in nakazujejo pomembne spremembe hidravličnih razmer v primeru odstranitve prečnega objekta. Opažene razlike so najverjetneje predvsem posledica različnega upoštevanja geometrijskih karakteristik struge ter možnosti izpisa rezultatov v primeru 2D modela. 1D model izvrednoti posamezne hidravlične spremenljivke za vsak prečni prerez je število dobljenih rezultatov v vzdolžnem prerezu sorazmerno omejeno. 2D model pa poda rezultate za vsako računsko celico. Na ta način lahko dobimo bolj zvezen vpogled v spremenljivost hidravličnih razmer vzdolž odseka struge vodotoka, seveda pa morajo biti v takšnem primeru tudi geometrijskih podatki o strugi (predvsem batimetrija dna) dobri. Prav tako pa računski modeli uporabljata različne načine upoštevanja geometrije struge in posledično vmesnih interpolacij, zaradi česar lahko pride do določenih odstopanja med rezultati.

Pomemben dejavnik, ki vpliva na razlike v rezultatih med 1D in 2D modeloma, je v različno upoštevanje geometrijskih karakteristik rečne struge, ki v primeru razpoložljivih podatkov v obeh modelih nista povsem enaki. Delno pa lahko razlike v rezultatih izračunov pripišemo tudi samemu postopku izračuna, saj 1D in 2D model uporabljata nekoliko drugačen računski postopek za izračun gladinskih stanj.

## 9 ZAKLJUČEK

Za zaključek lahko povemo, da odstranitev prečnih objektov vseeno ni tako enostavna, kot se morda zdi na prvi pogled. Tako kot vsaka gradnja objektov in stavb, ima tudi odstranitev prečnega objekta iz struge vodotoka velik vpliv na okolje in prostor. Prva misel, ki se nam poraja ob potencialni odstranitvi objekta iz struge vodotoka, nam dokazuje misliti, da je to pozitiven vidik na vodno telo in njegove organizme. V sklopu magistrske naloge smo ugotovili, da temu le ni tako. Obstaja kar nekaj razlogov, zakaj ni priporočljivo nepremišljeno odstranjevati prečne objekte iz struge vodotoka, ampak mora biti odstranitev tovrstnega objekta ustrezno analizirana z vidika potencialnih vplivov na hidravlične in erozijske razmere na odseku tako gorvodno kot dolvodno od objekta. Odstranitev objekta sicer predstavlja izboljšanje možnosti migracij vodnih organizmov, ampak hkrati tudi spremembo hidravličnih pogojev na daljšem odseku (ne samo neposredno na lokaciji objekta) ter s tem tudi spremembo življenjskih pogojev. Vsaka sprememba v vodotoku ali njegovem priobalnem pasu, na začetku negativno vplivajo na življenje v njem. Do ponovne prilagoditve novim rečnim razmeram in režimu lahko traja tudi do nekaj let, kar pa ni zagotovilo, da se bodo določene rečne vrste vrnile nazaj. Že sama sprememba v poteku dna struge ter morebitno oblikovanje spremenjene geometrije struge po odstranitvi objekta, potrebuje nekaj let do svojega novega ravnovesja, ki pa nikoli ne bo enaka razmeram pred umestitvijo prečnega objekta v vodotok.

Že pri samem projektiranju prečnih objektov moramo slediti trenutnim veljavnim smernicam za dimenzioniranje. S tem zagotovimo, da so objekti z vidika hidravlične prevodnosti ustrezno načrtovani in imajo minimalne vplive na vodotok. Pri čemer se upoštevajo tudi ostali deli prečnega objekta kot je določitev erozijskega tolmana pod objektom in zavarovanje le tega z ustreznimi podslapji in razbijači.

Pomembna ugotovitev pri odstranjevanju prečnih objektov iz struge je poznavanje hidromorfologije struge vodotoka. Prečni objekti so si med seboj različni, glede na višino, namen, lokacijo. Kar lahko predpostavimo pri enem vodotoku, ni rečeno, da bodo enake karakteristike veljale tudi za drug vodotok, čeprav gre na prvi pogled za enake razmere. Na spremembo v vodotoku vplivajo tudi poplavni dogodki, katere je nemogoče napovedati in predvideti na, kakšen način bodo vplivali na potek spremembe struge vodotoka.

Z novo pridobljenim znanjem iz teoretičnega dela, smo obravnavali razmere na odseku. Obravnavani prečni objekt na Kamniški Bistrici je bil ustrezno saniran in v skladu s smernicami Zavoda za ribištvo preoblikovan v drčo, ter ne bo dejansko odstranjen iz struge. Po svetu je bilo že narejenih nekaj študij, kjer so spremljali in merili spreminjanje poteka struge, po odstranitvi večjih in manjših prečnih objektov. Vendar so bile tamkajšnje razmere (tako hidrološke kot hidravlične) povsem drugačne kot so značilne pri nas. Naši vodotoki so večinoma hudourniški, s strmim padcem nivelete struge, tudi hidrološke karakteristike območja so drugačne. Predpostavke za preoblikovanje izhajajo iz tujih študij, kjer so karakteristike vodotoka drugačne od naših, zato je možno, da tovrstne predpostavke odstopajo od dejanskih razmer.

V kolikor bi se dejansko odstranjevalo prečne objekte iz struge vodotoka, bi bilo pri tem potrebno identificirati objekte, ki ne opravljajo nobene funkcije in so ob enem v slabem stanju. V naslednjem koraku, bi bilo priporočljivo izbrati objekt, ki bi ga se lahko kontrolirano odstranilo in pri tem sistematično spremljajo spremembe na odseku struge. Pri tem bi se izvajale meritve pretoka, premeščanja sedimentov in monitoring kakovosti voda. Problem nastane, ker ne znamo predvideti, na kakšen način bo poseg vplival na življenjsko združbo v strugi. Organizmi lahko doživijo "stres" zaradi česar obstaja možnost, da se le ti ne vrnejo več nazaj v njihovo naravno življenjsko okolje.

## VIRI

Agroskin, I. I. 1964. Hidravlika, Zagreb, Tehnička knjiga: str. 333.

Bizjak, A. 2010. Načrt upravljanja voda na vodnem območju Donave in na vodnem območju Jadranskega morja. Zvezek 7: Finančna sredstva. Inštitut za vode Republike Slovenije, Ljubljana.

Basson, G. R. 2009. Management of Siltation in Existing and New Reservoirs. General report Q. 89. Proceedings of the 23rd Congress of the International Commission on Large Dams, Vol. 2.

Bellmore, J. R., Duda, J. J., Craig, L. S., Greene, S. L., Torgersen, C. E., Collins, M. J., Vittum, K. 2016. Status and trends of dam removal research in the United States.

Bond, T. 2013. The geomorphic impact of sluice or weir removal. The river management Blog. <https://therivermanagementblog.wordpress.com/2013/01/30/the-geomorphic-impact-of-sluice-or-weir-removal/> (Pridobljeno 30.11.2020)

Chanson, H., Montes, J. S. 1998. Overflow characteristics of circular weirs: effects of inflow conditions. JI of Irrigation and Drainage Engrg., ASCE, vol. 124, n. 3.

Chanson, H. 2004. Environmental hydraulics of open channel flows. Chapter 2: Fundamentals of open channel flows, str. 11-34.

Coghlan, B, in sod. 2020. AMBER project. D4.2 Report of case studies demonstrating the effects of barrier removal, mitigation and installation.

Direkcija za vode. Ministrstvo za okolje in prostor. 2020. <https://www.gov.si/drzavni-organi/organi-v-sestavu/direkcija-za-vode/> (Pridobljeno 2. 11. 2020)

Doyle, M. W., Stanley, E. H., Harbor, J. M. 2003. Channel adjustments following two dam removals in Wisconsin. Water resources research / Volume 39, Issue 1.

East, A. E., Logan, J. B, Mastin, M. C., Ritchie, A. C., Bountry, J. A., Magirl, C. S., Sankey, J. B. 2018. Geomorphic evolution of a gravel-bed river under sediment-starved versus sediment-rich conditions: river response to the world's largest dam removal. Research article. Journal of Geophysical research: earth surface, str. 3338-3369.

Elbourne, N., Hammond, D., Mant, J. 2013. Weir removal, lowering and modification: A review of best practice. Environment Agency, Horizon House, Deanery Road, Bristol. Anglija.

EPA. 2009. Stormwater wet pond and wetland management guidebook. Centre for Watershed Protection, Ellicott City, Združene države Amerike.

Evreka. Reka Kamniška Bistrica. <https://www.evreka.si/reka-kamniska-bistrica.html> (pridobljeno 12. 1. 2021)

Ferjančič, K. 2019. Ocena prehodnosti prečnih vodnih objektov na reki Bači glede na mobilno sposobnost rib. Magistrsko delo. UL, BF, Študij ekologije in biodiverzitete, Ljubljana: str. 3-25.

Gardner, C. 2017. How weirs affect fish communities. South East River Trust. <https://www.southeastrivertrust.org/how-weirs-affect-fish-communities/> (Pridobljeno 13. 10. 2020)

Gippel, C.J., Blackham, D. 2002. Review of environmental impacts of flow regulation and other water resource developments in the River Murray and Lower Darling River system. Final Report by Fluvial Systems Pty Ltd, Stockton, to Murray-Darling Basin Commission, Canberra, ACT: str. 73-76.

Globevnik, L. 2012. Vzdrževanje vodne infrastrukture in vodotokov – pomen, realnost in perspektive. I. kongres o vodah Slovenije 2012. Ljubljana.

Globevnik, L in sod. 2014. Strokovne osnove za razvoj vodnih virov na porečju reke Mislinje. Št. elaborata: 6-GL/13. Tc VODE. Ljubljana: str. 70-92.

Gorišek, M., Kryžanowski, A. 2012. Načrtovanje, priprava in izvedba projektov vodne infrastrukture, financiranih s sredstvi kohezijskega sklada. Aktualni projekti s področja upravljanja z vodami in urejanje voda. 23. Mišičev vodarski dan 2012. Maribor.

Gradbeni zakon (Uradni list RS, št. 61/17, 72/17 – popr. In 65/20). <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO7108> (Pridobljeno 6. 10. 2020)

Grant, G. 2005. Out, pot, dam spot! The geomorphic response of rivers to dam removal. Science findings. Pacific Northwest Research Station. 71/marec 2005.

Hanania J., Stenhouse K., Suarez, L. V., Donev J. 2020. Weir. University of Calgary. Energy education. <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Weir> (Pridobljeno 13. 10. 2020)

Horvat, A., Brilly, M. 2010. Vpliv spodnje vode na izračun pretoka čez pregrado. Aktualni projekti s področja upravljanja z vodami in urejanje voda. Mišičev vodarski dan 2010. Maribor.

ICOLD. 2010. Selecting design parameters for large dams: Guidelines. CIGB-ICOLD.

Jevtić, L. 1978. Inženjski priručnik za reševanje problema iz oblasti bujičnih tokova. Beograd: str. 396.

Juran, V., Naglič, M. 2015. Upravljanje Nature 2000 in vodarska zakonodaja v luči naravovarstva. Aktualni projekti s področja upravljanja z vodami in urejanje voda. Mišičev vodarski dan 2015. Maribor.

Kitchen, A., Gauldie, R., Patterson, C., Bentley, S., Kirby, A. M. 2016. River weirs: Design, maintenance, modification and removal. CIRIA C763, London, UK.

Kohezijski sklad. Evropska komisija, razvoj regij in mest v EU, regionalna politika, financiranje. [https://ec.europa.eu/regional\\_policy/sl/funding/cohesion-fund/](https://ec.europa.eu/regional_policy/sl/funding/cohesion-fund/) (Pridobljeno 2. 11. 2020)

Kryžanowski, 2020. Hidrotehnični objekti. Predavanja, poglavja Pregrade, Prelivi, Betonske konstrukcije. Katedra za splošno hidrotehniko. FGG, UL, Ljubljana.

Land, T., Nandi, A., Luffman, I. 2017. Channel geomorphic evolution after dam removal: Is scale Important? Environmental & Engineering Geoscience, Vol. XXIII, No. 3, August 2017, str. 209-220.

Ljubljankić, H. 2020. Hidroenergetski potencial Kamniške Bistrice. Zaključna seminarska naloga. Oddelek za geografijo, Filozofska fakulteta, UL, Ljubljana.

Lubej, G. 2016. Načrtovanje VGU s programskim orodjem Autodesk Civil 3D. Diplomsko delo. UM, FGPA, Maribor: str. 3-7.

Magilligan, F. J., Nislow K. H., Kynard, B. E., Hackman, A.M. 2015. Immediate changes in stream channel geomorphology, aquatic habitat, and fish assemblages following dam removal in a small upland catchment. *Geomorphology* 252 (2016) str. 158-170.

Mahtabi, G., Chaplot, B., Azamathulla H. M., Pal, M. 2020. Classification of Hydraulic Jump in Rough Beds. Article. Licensee MDPI, Basel, Switzerland.

Major, J. J., East, A. E., O'Connor, J. E., Grant, G. E., Wilcox, A. C., Magirl, C. S., Collins, M. J., Tullos, D. D. 2017. Geomorphic responses to dam removal in the United States – a two decade perspective. *Gravel – bed rivers: process and disasters*, first edition, str: 355-382.

Markič, T. Stabilizacijski objekti v vodotokih. Magistrska naloga. UL, FGG, Gradbeništvo – Hidrotehnična smer, Ljubljana: str. 9-141.

Marušič I., Seidl N., Drašler A. 2005. Pravila za vzdržno urejanje posegov v vode. Končno poročilo. UL, Biotehnična fakulteta, Oddelek za krajinsko arhitekturo, Ljubljana.

Miedema, S., A. 2010. Constructing the shields curve, a new theoretical approach and its application. WODCOM XIX, Peking, Kitajska.

Mikoš, M., Pemič, A. 2005. Inženirska hidrotehnika. UL, FGG, Katedra za splošno hidrotehniko, Ljubljana: str. 42-50.

Mikoš, M. 2008. Osnove hudourništva, skripta. UL, FGG, Katedra za splošno hidrotehniko, Ljubljana: str. 1-33.

Mikoš, M. 2007. Urejanje vodotokov, skripta. UL, FGG, Katedra za splošno hidrotehniko, Ljubljana: str. 153-196.

Mueller, M., Pander, J., Geist, J. 2011. The effects of weirs on structural stream habitat and biological communities. *Journal of Applied Ecology*. Aquatic Systems Biology Unit, Department of Ecology and Ecosystem Management, Technische Universität München, Germany.

Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri C., Narayanan, R. 2007. Hydraulic structures. Fourth edition. Taylor and Francis Group. London and New York: str. 321-360.

NSW Department of Primary Industries. 2006. Reducing the Impact of Weirs in Aquatic Habitat – New South Wales Detailed Weir Review. Southern Rivers CMA region. NSW Department of Primary Industries, Flemington, NSW.

Padulano, R., Fecarotta, O., Giudice, G., Carravetta, A. 2017. Hydraulic design of a USBR type II Stilling basin. American society of civil engineers. [https://www.researchgate.net/publication/312545178\\_Hydraulic\\_design\\_of\\_a\\_USBR\\_Type\\_II\\_stilling\\_basin](https://www.researchgate.net/publication/312545178_Hydraulic_design_of_a_USBR_Type_II_stilling_basin) (Pridobljeno 24. 3. 2021)

Petje, U., Sodnik, J. 2018. Tehnično poročilo. Kamniška Bistrica – sanacija zajede, PZI 114/2018. Ljubljana, Slovenija.

Pizzuto, J. 2002. Effects of dam removal on river form and process. *Articles. Bio Science*. Vol. 52, No. 8.

Pravilnik o določitvi vodne infrastrukture (Uradni list RS, št. 46/05) <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV6396> (Pridobljeno 3. 11. 2020)

Pravilnik o vrstah in obsegu nalog obveznih državnih gospodarskih javnih služb urejanja voda (Uradni list RS, št. 57/06, 60/16, 82/20 – ZON-E in 91/20) <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=PRAV6505> (Pridobljeno 4. 11. 2020)

Ravnanje s stvarnim premoženjem. <https://www.gov.si/zbirke/storitve/ravnanje-s-stvarnim-premozenjem/> (Pridobljeno 5. 11. 2020)

Reddy, R. 2020. Classification or types of Notches and Weirs. Fluid mechanics. Article. <https://www.engineeringenotes.com/fluids/weirs/classification-or-types-of-notches-and-weirs-fluid-mechanics/47397> (Pridobljeno 23. 3. 2021)

Repnik P., 2007. Poročilo o nalogi I/1/2/2. IzVRS, Sektor za celinske vode, Ljubljana: str. 10, 11.

Repnik Mah, P. 2013. Primeri sonaravnega urejanja površinskih voda. IzVRS, Ljubljana.

Rickard, C., Rodney, D., Purseglove J. 2003. River Weirs – Good Practice Guide. Guide – Section A. Environmental Agency, Bristol, UK.

Rickard, C., Rodney, D., Purseglove J. 2003. River Weirs – Good Practice Guide. Guide – Section B. Environmental Agency, Bristol, UK.

Rickard, C., Rodney, D., Purseglove J. 2003. River Weirs – Good Practice Guide. Guide – Section B3. Environmental Agency, Bristol, UK.

Seqwater, water for life. 2020. Why are weirs dangerous. <https://www.seqwater.com.au/dams-and-weirs> (Pridobljeno 13. 10. 2020)

Izvajaje javne službe na področju urejanja voda. Slovenska poslovna točka. Ministrstvo za javno upravo. <http://evem.gov.si/info/dejavnosti/dejavnost/14481/prikaziDejavnost/> (Pridobljeno 2. 11. 2020)

Slovenski regionalno razvojni sklad. Javni sklad Republike Slovenije za regionalni razvoj in razvoj podeželja. Ministerstvo za gospodarski razvoj in tehnologijo. <http://www.regionalnisklad.si/> (Pridobljeno 2. 11. 2020)

Steinman, F., Banovec, P. 2008. Hidrotehnika. Vodne zgradbe I. UL, FGG, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem, Ljubljana.

Steinman, F. 2010. Hidravlika. 2. ponatis. UL, FGG, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem, Ljubljana: str. 102 – 129; 197 – 203.

Suhadolnik, P. 2007. Urejanje hudournikov in varstvo okolja na primeru Podlipščice. UL, BF, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive vire, Ljubljana.

Tičar, J. 2012. Geomorfološke značilnosti zatrepnih dolin v Sloveniji in Franciji. Diplomsko delo. Oddelek za geografijo. Filozofska fakulteta. UL, Ljubljana.

Tracy, H., J. 1957. Discharge characteristics of broad-crested weirs. Geological survey. United states department of the interior. Washington, D.C.

Urbančič in sod. 2015. Elementi stanja voda pri določanju ekološko sprejemljivega pretoka – predstavitev ciljnega raziskovalnega dela. Aktualni projekti s področja upravljanja z vodami in urejanje voda. Mišičev vodarski dan 2015. Maribor.

Uredba o posegih v okolje, za katere je treba izvesti presojo vplivov na okolje (Uradni list RS, št. 51/14, 57/15, 26/17 in 105/20). <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED6527> (Pridobljeno 6. 10. 2020)

Uredba o razvrščanju objektov (Uradni list RS, št. 37/18) <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED7671> (Pridobljeno 7. 10. 2020)

Wan, W., Raza, A., Chen, X. 2019. Effect of height and geometry of stepped on inception point location. Department of Hydraulic Engineering, College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Kitajska.

Zabric, D., Pliberšek, K., Albreht, G., Bertok, M., Tavčar, T., Ramšak, L., Čarf, M. 2010. Problematika sanacijskih in vzdrževalnih del na vodotokih s stališča Zavoda za ribištvo Slovenije. Aktualni projekti s področja upravljanja z vodami in urejanje voda. Mišičev vodarski dan 2010. Maribor.

Zakon o varstvu okolja (Uradni list RS, št. 39/06 – uradno prečiščeno besedilo, 49/06 – ZmetD, 66/06 – odl. US, 33/07 – ZPNačrt, 57/08 – ZFO-1A, 70/08, 108/09, 108/09 – ZPNačrt-A, 48/12, 57/12, 92/13, 56/15, 105/15, 30/16, 61/17 – GZ, 21/18 – ZNOrg in 84/17 – ZIURKOE) <http://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO1545> (Pridobljeno 6. 10. 2020)

Zakon o vodah (Uradni list RS, št. 67/02, 2/04 – ZZdl-A, 41/04 – ZVO-1, 57/08, 57/12, 100/13, 40/14, 56/15 in 65/20) <http://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO1244> (Pridobljeno 6. 10. 2020)

Zhang, H., Muto, Y., Nakagawa, H., Nakanishi, S. 2012. Weir removal and its influence on hydro-morphological features of upstream channel.