

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Bogovič, B. 2013. Optimizacija zasnove verige HE na srednji Savi na odseku pri Litiji. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Kryžanowski, A., somentor Schnabl, S.): 74 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Bogovič, B. 2013. Optimizacija zasnove verige HE na srednji Savi na odseku pri Litiji. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kryžanowski, A., co-supervisor Schnabl, S.): 74 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
HIDROTEHNIČNA SMER

Kandidat:

BENJAMIN BOGOVIČ

**OPTIMIZACIJA ZASNOVE VERIGE HE NA SREDNJI
SAVI NA ODSEKU PRI LITIJI**

Diplomska naloga št.: 3267/HS

**OPTIMIZATION OF THE HYDRO POWER PLANT
DESIGN ON THE MIDDLE SAVA RIVER STRECH -
SECTION LITIJA**

Graduation thesis No.: 3267/HS

Mentor:

doc. dr. Andrej Kryžanowski

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

doc. dr. Simon Schnabl

Član komisije:

doc. dr. Dušan Žagar

izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov

Ljubljana, 25. 01. 2013

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

(prazna stran)

IZJAVE

Podpisani **BENJAMIN BOGOVIČ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom
»**Optimizacija zasnove verige HE na srednji Savi na odseku pri Litiji**«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 18. 1. 2013

(podpis)

(prazna stran)

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	627.8(282.243.743)(497.4)(043.2)
Avtor:	Benjamin Bogovič
Mentor:	doc. dr. Andrej Kryžanowski
Somentor:	doc. dr. Simon Schnabl
Naslov:	Optimizacija zasnove verige HE na srednji Savi na odseku pri Litiji
Obseg in oprema:	74 str., 6 pregl., 57 sl., 10 en., 12 pril.
Ključne besede:	HE na srednji Savi, HE Ponoviče, optimizacija, Litija, gumeni jez

Izvleček

Diplomsko delo obravnava optimizacijo zasnove odseka na srednji Savi pri Litiji, kjer je načrtovana derivacijska hidroelektrarne Ponoviče. Namen naloge je podati celovito rešitev za obravnavano območje z vidika energetskega, prostorskega in okoljskega vidika. V uvodu je opisan pomen hidroenergije v Republiki Sloveniji, ki močno prednjači v primerjavi z drugimi viri obnovljive energije. Energetska politika je zapisana v nacionalnem energetskega programu, ki je strateški dokument z dolgoročnimi razvojnimi cilji in usmeritvami. Eden izmed glavnih projektov je tudi izgradnja hidroelektrarn na srednji Savi, ki bo povezala verigo hidroelektrarn vzdolž celotne struge reke Save. V diplomski nalogi je podrobno opisana zasnova verige, koncesijska uredba, režim obratovanja, načrtovani objekti in ureditve. Praktični del naloge predstavlja iskanje rešitev za območje Litije. Derivacijska hidroelektrarna Ponoviče bo povzročila preusmeritev precejšnjega dela toka reke Save skozi dovodni rov iz akumulacije pregrade Pogonik do strojnice v Ponovičah. S tem bosta pretok in vodostaj v strugi skozi Litijo močno zmanjšana, zato se lahko pomembno spremeni značaj vodotoka in mestna veduta, kar je glavni pomislek lokalne skupnosti. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo ter podjetje Geateh sta leta 2007 izdelali predinvesticijsko tehnično prostorsko dokumentacijo za hidroelektrarne na srednji Savi, ki predvideva izgradnjo dveh pragov kot odgovor na te pomisleke in zahteve. Predlagano zasnovo smo analizirali in naredili računski hidravlični model obstoječega stanja. Predlagana zasnova je optimalna iz energetskega vidika, medtem ko okoljska in prostorska vprašanja niso podrobno obravnavana. Zato smo naredili novo zasnovo s tremi pragovi, kjer energetska izraba odseka ni v prvem planu. Ugotovili smo, da zasnova s tremi pragovi zahteva manj posegov v prostor in je okoljsko sprejemljivejša, hkrati pa omogoča višjo zaježno gladino v mestnem profilu. Na novo smo zasnovali strojnico in uporabili turbine Straflomatrix, ki v Sloveniji še niso bile uporabljene. Pregrado smo zasnovali kot prag z gumeno membrano. S pomočjo podolžnega profila smo določili potrebno poglobitev struge ter določili koto in stacionažo visokovodnih nasipov. Za obravnavan odsek smo predlagali nove ureditve obvodnega prostora, s katerimi bo mesto dobilo nove rekreacijske površine in turistični potencial za nadaljnji razvoj.

(prazna stran)

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 627.8(282.243.743)(497.4)(043.2)
Author: Benjamin Bogovič
Supervisor: Assistant professor Andrej Kryžanowski, Ph.D.
Co-Supervisor: Assistant professor Simon Schnabl, Ph.D.
Title: Optimization of the Hydro Power Plant Design on the Middle Sava River Strech - Section Litija
Notes: 74 p., 6 tab., 57 fig., 10 eq., 12 ann.
Key words: HPP on the middle Sava River, HPP Ponoviče, optimization, Litija, rubber dam

Abstract

This thesis deals with the optimisation design of the Litija section on the middle Sava River where Ponoviče derivation hydro power plant is being planned. The aim of the thesis is to propose an overall solution for the discussed area from the hydropower, spatial development and environmental point of view. In the introduction, the importance of hydroelectric energy in the Republic of Slovenia is described, as it is the far most important renewable energy source in this country. Energy policy is stated in the national energy programme – a strategic document with long-term development targets and directives. Among the most important projects, there is also the construction of HPP on the middle Sava River that will complete the chain of power plants on the Sava River. This thesis contains the detailed description of the chain design, concession regulation, operational regime, designed facilities and regulations. The empirical part constitutes the solutions for the Litija area. The Ponoviče derivation HPP will cause the redirection of the original Sava River stream through the derivation tunnel to the engine room in Ponoviče. This is why the flow of water and water level in the stream through Litija will reduce which will change the water course and the environment of the town alongside the Sava River significantly being one of the main concerns of the local population. As a solution to these concerns, 2007 the Faculty of Civil and Geodetic Engineering and the company Geateh prepared the pre-investment technical spatial documentation for HPP on the middle Sava River providing the construction of two small dams. In this thesis, the suggested design was analysed, the mathematical hydraulic model of the existing situation and suggested solutions were made and it was ascertained that the optimisation with three smaller broad crested weirs is possible. The model resulted in profiles that enable the comparison between designed regulations. This new design affects less the physical environment and is therefore preferable as well as it assures higher dam river level alongside the town. The engine room was redesigned with Straflomatrix turbines. The dam-barrage was designed as a broad crested weir with a rubber membrane. For the analysed section, we suggested new regulations of river surrounding in order to get new recreational surfaces and tourism potential for further development.

(prazna stran)

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Andreju Kryžanowskemu in somentorju doc. dr. Simonu Schnablu za vso strokovno pomoč in nasvete pri izdelavi diplomske naloge.

Zahvaljujem se Juretu Šimicu in podjetju Holding slovenskih elektrarn d.o.o., ki mi je omogočilo dostop do potrebne dokumentacije in podjetju Savatech d.d. za pomoč pri obravnavi gumenih jezov.

Zahvala gre tudi Nuklearni elektrarni Krško za kadrovske štipendije, ki mi je močno olajšala študij.

Posebna zahvala gre moji družini in vsem prijateljem, ki so me tekom študija spodbujali in mi vedno stali ob strani.

(prazna stran)

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	ENERGETSKA POLITIKA REPUBLIKE SLOVENIJE	3
2.1	Cilji in zaveze energetske politike Slovenije	3
2.2	Nacionalni energetski program	3
2.3	Hydroenergetski potencial	5
2.4	Proizvodnja in poraba električne energije.....	7
3	PROJEKT IZGRADNJE HIDROELEKTRARN NA SREDNJI SAVI	9
3.1	Strategija prostorskega razvoja Slovenije	9
3.2	Koncesijska uredba	9
3.3	Kronološki pregled izgradnje hidroelektrarn na reki Savi	10
3.4	Načrtovani objekti.....	11
3.5	Etapnost izgradnje.....	12
3.6	Bruto energetski potencial.....	13
3.7	Režim obratovanja.....	13
3.8	Geološka zgradba in morfologija	16
3.9	Hidrologija	17
3.10	Pregradni objekti	19
3.10.1	<i>Jezovna zgradba s pretočnimi polji</i>	20
3.10.2	<i>Pogonski objekt</i>	21
3.11	Sistemske stroitve.....	24
3.12	Energetski in visokovodni nasipi	25
3.13	Ureditve brežin.....	26
3.14	Sistem vodenja hidroelektrarn.....	26
3.15	Okoljska sprejemljivost.....	26
3.16	Pozitivni učinki gradnje HE	27

4	OBRAVNAVA ODSEKA PRI LITIJI	28
4.1	Litija	28
4.2	HE Ponoviče	28
4.3	Hidravlični model obstoječega stanja	31
4.4	Problematika obravnavanega odseka	33
4.4.1	<i>Zahteve lokalne skupnosti</i>	33
4.4.2	<i>Oskrba s pitno vodo</i>	34
4.4.3	<i>Zaraščanje in zaplavljanje struge</i>	35
4.5	Upoštevani kriteriji	36
4.6	Pregled do sedaj izvedenih zasnov energetske izrabe Save na območju Litije	36
4.7	Analiza do sedaj izvedenih zasnov energetske izrabe Save na območju Litije	38
4.7.1	<i>Pregrada mHE</i>	40
4.7.2	<i>Strojnica mHE</i>	41
4.8	Optimizacija s tremi pragovi	42
4.8.1	<i>Prag PODŠENTJUR</i>	42
4.8.2	<i>Prag LITIJA</i>	44
4.8.3	<i>Prag PONOVIČE</i>	46
4.9	Presoja predlagane rešitve	47
4.10	Nadvišanje zemljišč	49
4.11	Poglobitev struge	50
4.12	Visokovodni nasipi	51
5	PREGRADNI OBJEKT	52
5.1	Opis pregrade	52
5.1.1	<i>Prelivno polje</i>	53
5.1.2	<i>Strojnica</i>	53
5.1.3	<i>Vzdolžni prerez pregrade</i>	54
5.2	Organizacija gradbišča	55

5.3	Gumijast jez	55
5.4	Izbor turbine	58
5.4.1	<i>Hydromatrix tehnologija</i>	58
5.4.2	<i>Straflomatrix turbine</i>	59
5.4.3	<i>Moč agregata</i>	60
5.4.4	<i>Prefabricirani turbinski modul</i>	60
5.5	Prevajanje visokih voda	61
5.6	Preračun stabilnosti jezovne zgradbe	63
5.6.1	<i>Rezultanta delujočih sil</i>	63
6	HIDROTEHNIČNE UREDITVE	64
6.1	Mestni profil.....	64
6.2	Izven mestni profil	66
7	ZAKLJUČEK	68
VIRI	71

(prazna stran)

KAZALO PREGLEDNIC

<i>Preglednica 1: Investicijski projekti do leta 2020 (prirejeno po Urbančič, 2011).....</i>	<i>5</i>
<i>Preglednica 2: Energetski potencial slovenskih rek (Kryžanowski in Rosina, 2012).....</i>	<i>6</i>
<i>Preglednica 3: Osnovni podatki o elektrarnah (Študija FGG in Geateh, 2007).....</i>	<i>12</i>
<i>Preglednica 4: Tehnične karakteristike HE Ponoviče.....</i>	<i>29</i>
<i>Preglednica 5: Tehnične karakteristike načrtovanih pragov.....</i>	<i>60</i>
<i>Preglednica 6: Rezultante delujočih sil.....</i>	<i>63</i>

(prazna stran)

KAZALO SLIK

<i>Slika 1: Proizvodnja električne energije na pragu 2011 (SURs, 2012).....</i>	<i>7</i>
<i>Slika 2: Letna bilanca proizvodnje in porabe električne energije,</i>	<i>8</i>
<i>Slika 3: Usmeritve za razvoj energetskih sistemov (OdSPRS, 2004).....</i>	<i>9</i>
<i>Slika 4: Situacija verige HE na srednji Savi (prirejeno po Kryžanowski, 2006).....</i>	<i>11</i>
<i>Slika 5: Režim delovanja HE v pasu in konici (Študija FGG in Geateh, 2007).....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 6: Moduli odtoka za obdobje 1961-1990 za Savo na VP Litija (Kryžanowski et al, 2007)</i>	<i>17</i>
<i>Slika 7: Prispevne površine srednje Save (Študija FGG in Geateh, 2007).....</i>	<i>18</i>
<i>Slika 8: Idejna zasnova HE Suhadol (http://www.ikb.si)</i>	<i>19</i>
<i>Slika 9: Prečni prerez tipičnega prelivnega polja (Študija FGG in Geateh, 2007).....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 10: Prečni prerez tipične strojnice z cevno turbino (Študija FGG in Geateh, 2007).....</i>	<i>22</i>
<i>Slika 11: Prečni prerez strojnice HE Ponoviče s Kaplanovo turbino (Študija FGG in Geateh, 2007).....</i>	<i>24</i>
<i>Slika 12: Primer ureditve brežin s kameno zložbo v betonu (http://www.hess.si) in sonaravne ureditve (http://www.ribiska-druzina-radece.si/).....</i>	<i>26</i>
<i>Slika 13: Energetske lokacije na velikih vodotokih (Kryžanowski in Rosina, 2012)</i>	<i>28</i>
<i>Slika 14: Situacija obravnavanega odseka z vrisano HE Ponoviče.....</i>	<i>29</i>
<i>Slika 15: Pregrada Pogonik z vtokom v dovodni tunel (Študija FGG in Geateh, 2007).....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 16: Vzдолžni profil obravnavanega odseka.....</i>	<i>32</i>
<i>Slika 17: Struga reke Save pri pretoku $Q_{es} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$</i>	<i>33</i>
<i>Slika 18: Vodovarstveni pasovi v Litiji (M 1:25 000)</i>	<i>34</i>
<i>Slika 19: Zaraščena in gola prodišča v stari strugi reke Drave pod pregrado Markovci (M 1:25000)</i>	<i>35</i>
<i>Slika 20: Prag Litija I (Študija FGG in Geateh, 2007).....</i>	<i>37</i>
<i>Slika 21: Prag Litija II (Študija FGG in Geateh, 2007)</i>	<i>37</i>
<i>Slika 22: Nadvišanje kmetijskih površin dolvodno od Litije (Študija FGG in Geateh, 2007)</i>	<i>38</i>
<i>Slika 23: Vzдолžni profil obravnavanega odseka z dvema pragoma.....</i>	<i>39</i>
<i>Slika 24: Prečni prerez prelivnega polja (Študija FGG in Geateh, 2007).....</i>	<i>40</i>

<i>Slika 25: Prečni prerez strojnice mHE (Študija FGG in Geateh, 2007).....</i>	<i>41</i>
<i>Slika 26: Oglad terena lokacije pragu Podšentjur</i>	<i>42</i>
<i>Slika 27: Obravnavan odsek pragu Podšentjur z označenimi prečnimi profili.....</i>	<i>43</i>
<i>Slika 28: Prečni profil P-16 pri različni pretokih in robnih pogojih.....</i>	<i>44</i>
<i>Slika 29: Struga reke Save v mestnem profilu</i>	<i>44</i>
<i>Slika 30: Obravnavan odsek pragu Litija z označenimi prečnimi profili.....</i>	<i>45</i>
<i>Slika 31: Prečni profil P-21 pri različni pretokih in robnih pogojih.....</i>	<i>45</i>
<i>Slika 32: Oglad terena lokacije pragu Ponoviče.....</i>	<i>46</i>
<i>Slika 33: Obravnavan odsek pragu Ponoviče z označenimi prečnimi profili.....</i>	<i>46</i>
<i>Slika 34: Vzдолžni profil obravnavanega odseka s tremi pragovi.....</i>	<i>48</i>
<i>Slika 35: Nadvišanje kmetijskih površin na Pijavškem polju (http://www.he-ss.si).....</i>	<i>49</i>
<i>Slika 36: Povečanje hidravličnega padca s poglobitvijo struge pod pregrado.....</i>	<i>50</i>
<i>Slika 37: Prečni prerez tipičnega zemeljskega nasipa na obravnavanem odseku</i>	<i>51</i>
<i>Slika 38: Tloris pregradnega objekta z opisi.....</i>	<i>52</i>
<i>Slika 39: Prečni prerez tipičnega prelivnega polja z opisi.....</i>	<i>53</i>
<i>Slika 40: Prečni prerez tipične strojnice z opisi.....</i>	<i>54</i>
<i>Slika 41: Vzдолžni prerez pregrade z opisi.....</i>	<i>54</i>
<i>Slika 42: Shema osuševanja gradbišča z delnim zapiranjem vodotoka (Steinman in Banovec, 2008).....</i>	<i>55</i>
<i>Slika 43: Zasnova gumenega jezua (Gebhardt,2007).....</i>	<i>56</i>
<i>Slika 44: Shema manipulacijskega jaška (prirejeno po http://www.hydroconstruct.at)</i>	<i>56</i>
<i>Slika 45: Koeficient preliava za vodno polnjeni gumeni jez (Gebhardt, 2007).....</i>	<i>57</i>
<i>Slika 46: Primer uporabe Straflomatrix turbin (Andritz, 2012).....</i>	<i>58</i>
<i>Slika 47: Straflomatrix enoti (Andritz, 2012).....</i>	<i>58</i>
<i>Slika 48: Primerjava hydromatrix turbin (prirejeno po Andritz, 2012).....</i>	<i>59</i>
<i>Slika 49: Opis prefabriciranega turbinskega modula</i>	<i>61</i>
<i>Slika 50: Široki prag (Steinman, 1999)</i>	<i>61</i>
<i>Slika 51: Primer dobre prakse obrečnega prostora v mestnem profilu (www.vhsktn.at).....</i>	<i>64</i>

<i>Slika 52: Stanje brežin v mestnem profilu v Litiji</i>	<i>64</i>
<i>Slika 53: Ureditev sprehajalne poti na levem bregu reke Save vzdolž protipoplavnega zidu.....</i>	<i>65</i>
<i>Slika 54: Več funkcijski protipoplavni zid (www.freeclimbers.at).....</i>	<i>65</i>
<i>Slika 55: Sonaravno oblikovana brežina na desnem bregu reke Save.....</i>	<i>66</i>
<i>Slika 56: Nasuta vdrževalna pot in naravno zaraščena brežina (DESNO) na Pijavškem polju ob akumulaciji HE Krško.....</i>	<i>66</i>
<i>Slika 57: Ureditve na visokovodnem nasipu</i>	<i>67</i>

(prazna stran)

1 UVOD

V Sloveniji in po svetu, potreba po električni energiji stalno narašča. Primanjkljaj električne energije je posledica razkoraka med stalno rastjo porabe in omejenih proizvodnih zmogljivosti. Trend naraščanja svetovnega prebivalstva pa še povečuje potrebe in rabo električne energije. Svet se v 21. stoletju sooča z dejstvom, da so neobnovljivi viri energije že omejeni, njihovo izkoriščanje pa zaradi zahtevnosti tehnološkega procesa vse dražje. Poleg tega se z zavedanjem o podnebnih spremembah in pomenu čistega okolja krepi občutek nujnosti prehoda v nizkoogljično družbo. Za doseg tega cilja pa je potrebno pospešeno vlaganje v obnovljive vire energije in v učinkovito rabo energije.

Vodotoki v Sloveniji niso energetske optimalno izkoriščeni, izjema je reka Drava, na kateri pa že poteka optimizacija in modernizacija obstoječih objektov ter se načrtuje gradnje črpalne elektrarne Kozjak. Edina mogoča in za enkrat okoljsko sprejemljiva je energetska izraba reke Save. Trenutno so v obratovanju HE Moste, HE Mavčiče, HE Medvode, HE Vrhovo, HE Boštanj in HE Blanca. V poskusnem obratovanju je HE Krško, za HE Brežice je sprejet državni prostorski načrt, HE Mokrice pa je v postopku umeščanja v prostor. Neizkoriščen pa ostaja odsek od Medvod do Vrhovega, kjer je načrtovan projekt izgradnje hidroelektrarn na srednji Savi. Vlada Republike Slovenije je dne 11.11.2004 podpisala uredbo o koncesiji za rabo vode za proizvodnjo električne energije na delu vodnega telesa reke Save od Ježice do Suhadolega. S to uredbo je bil omogočen začetek načrtovanja in iskanja optimalnih rešitev za umestitev bodoče verige v prostor. V letu 2007 je bila narejena predinvesticijska tehnično prostorska študija z namenom celovitega prikaza možnosti energetske izrabe odseka, vključno z upoštevanjem omejitev rabe prostora zaradi naravovarstvenih razlogov. V študiji so bile narejene primerjalne analize med varianto energetske izrabe po koncesijskih pogojih in alternativno varianto, ki izhaja iz optimizacije izrabe prostora za energetske namene ob sočasnem upoštevanju okoljevarstvenih načel pri načrtovanju posegov v prostor. V alternativni varianti sta bila obravnavana dva ključna odseka, Ljubljanski del, med Tacnom in Zalogram ter območje stare struge Save pri Litiji, ki bi bilo degradirano s preusmeritvijo glavnega pretoka skozi derivacijsko elektrarno Ponoviče mimo mestnega območja Litije. Predmet diplomskega dela je optimizacija tehnične in prostorske zasnove ureditve energetske izrabe na odseku pri Litiji, ki je bila predlagana v okviru primerjalne študije.

Diplomsko delo je sestavljeno iz dveh delov. Prvi del predstavlja pregled in analizo do sedaj izvedenih energetske zasnove energetske rabe srednje Save s poudarkom na odseku pri Litiji. Drugi del pa predstavlja optimizacijo energetske izrabe obravnavanega odseka s celostno ureditvijo obvodnega prostora s prostorskega in okoljskega vidika. Gorvodno od Litije je predvidena pregrada Pogonik z akumulacijo za derivacijsko hidroelektrarno Ponoviče. Večji del pretoka reke Save bo po dovodnem rovu obšlo Litijo, kjer je zagotovljen le biološki minimum. Zahteva občine Litija je, da se v celoti

ohrani vizualna podoba telesa reke Save. Za ugoditev tej zahtevi se predvideva izdelava tehnične optimizacije načrta izgradnje pragov, s čimer bi dvignili gladino vode pri biološkem pretoku in tako ohranili vizualno podobo reke. Izdelali smo računsko hidravlični model obravnavanega odseka in preverili obstoječi predlog z dvema pragovoma. Na podlagi rezultatov smo ugotovili, da lahko obstoječi predlog optimiziramo, tako smo naredili varianto s tremi pragovi. Ta možnost se izkaže za boljšo, saj zahteva bistveno manj prostora in je okoljsko bolj sprejemljiva. Energetska izraba na obravnavanem odseku ni v prvotnem planu načrtovanih ureditev, ampak sledi prostorski in okoljski sprejemljivosti umestitve pragov, brez večjih negativnih vplivov v prostoru. Na podlagi predlaganih pragov in izračunov gladin so bile narejene hidrotehnične ureditve obvodnega prostora vzdolž odseka.

2 ENERGETSKA POLITIKA REPUBLIKE SLOVENIJE

2.1 Cilji in zaveze energetske politike Slovenije

Energetika se srečuje z novimi izzivi, ki bodo definirali prihodnji razvoj tega sektorja. Prehod v nizkoogljično družbo, zagotavljanje zanesljive in konkurenčne energije ob čim manjši obremenitvi okolja so cilji, katerim mora biti podrejen nadaljnji razvoj. Zaradi ugodne strukture virov za proizvodnjo električne energije, dobre geostrateške pozicije in povezave s sosednjimi sistemi si je Republika Slovenija zadala visoke cilje:

- 20-odstotno izboljšanje učinkovitosti rabe energije (URE) do l. 2020
- 25-odstoten delež obnovljivih virov energije (OVE) v rabi bruto končne energije do l. 2020
- 9,5-odstotno zmanjšanje emisij toplogrednih plinov (TGP) iz zgorevanja goriv do l. 2020
- zmanjšanje energetske intenzivnosti za 29 odstotkov do l. 2020

Za doseg teh ciljev so predlagana naslednja prednostna področja:

- učinkovita raba energije
- izkoriščanje obnovljivih virov energije
- razvoj omrežij za distribucijo električne energije z uvajanjem aktivnih omrežij

Na tehnološke spremembe se mora sektor dobro pripraviti, saj prinašajo veliko novih priložnosti za razvoj domače industrije. Z uvajanjem novih tehnologij na področju energetike, bomo spodbudili razvoj domačih podjetij, ki bodo na novo pridobljena znanja in izkušnje unovčila na globalnem trgu. Trg zelenih energetskih tehnologij in storitev je med najhitreje razvijajočimi se globalnimi trgi in na katere gospodarska kriza ni imela bistvenega vpliva. Za osvojitve teh trgov je potrebno veliko vlaganja v znanost in razvoj, prav tako pa je potrebna višja raven izobrazbe od povprečja v gospodarstvu (MG, 2011).

2.2 Nacionalni energetski program

Nacionalni energetski program (NEP) je dolgoročni strateški dokument, ki služi za izvajanje energetske politike. V skladu z Energetskim zakonom (EZ) ga mora pripraviti vlada RS, državni zbor pa nato odloča o njem. NEP je pripravljen skladno z zahtevami EZ in določa dolgoročne razvojne cilje in usmeritve upošteva okoljske in tehnološke kriterije, razvoj javne infrastrukture in infrastrukture državnega pomena ter spodbude in mehanizme za spodbujanje uporabe OVE in izvajanje ukrepov za URE. Vsebuje cilje, usmeritve ter strategijo rabe in oskrbe z energijo, ukrepe za doseganje ciljev, perspektivne energetske bilance in oceno učinkov glede doseganja ciljev.

Cilji na področju proizvodnje električne energije so zagotavljanje:

- konkurenčne proizvodnje električne energije v Sloveniji, donosnost projektov in poslovanja podjetij
- zmanjševanje obremenitev okolja in dolgoročen prehod na nizkoogljične vire
- 40-odstotnega deleža proizvodnje električne energije iz OVE v bruto končni rabi električne energije do leta 2020 in 53-odstotnega deleža OVE do leta 2030 ter s tem prispevati k izpolnitvi cilja 25-odstotnega deleža OVE v bruto končni rabi energije do leta 2020
- avtonomnosti elektroenergetskega sistema v kritičnih razmerah in diverzifikacije povezav s sosednjimi trgi
- ustrezne kakovosti in zanesljivosti oskrbe z električno energijo pri končnem odjemalcu

Za dosego ciljev bo Vlada RS prednostno zagotavljala podporno okolje za:

- prednostno izrabo potencialov OVE za proizvodnjo električne energije
- izkoriščanje visoko učinkovite soproizvodnje toplotne in električne energije SPTE
- diverzifikacijo virov pri proizvodnji električne energije najmanj na sedanji ravni
- zagotavljanje pretežnega deleža proizvodnje iz domačih virov energije
- nadaljnje izkoriščanje premogovnika Velenje v povezavi s proizvodnjo električne energije in postopno zapiranje do leta 2050
- nadaljnje dolgoročno izkoriščanje jedrske energije v Sloveniji
- postopno prenehanje uporabe uvoženega premoga za proizvodnjo električne energije do leta 2020
- pospešeno uvajanje nizkoogljičnih tehnologij za proizvodnjo električne energije

Za doseganje vseh teh ciljev je potrebno investirati v nove zmogljivosti in nadgrajevati obstoječe objekte, kjer je to ekonomsko upravičeno. Glede na pričakovano rast porabe električne energije in zapiranje nekaterih termoelektrarn je v NEP-u predlaganih več objektov s katerimi se zadosti potrebam po električni energiji v prihodnosti (Urbančič, 2011).

Preglednica 1: Investicijski projekti do leta 2020 (prirejeno po Urbančič, 2011)

Projekti / Objekti	Moč na pragu (MW)	Predviden rok	Nosilec/izvajalci
Podaljšanje življenjske dobe NEK		2023	NEK
Prenova HE na Dravi: HE Zlatoličje HE Formin	Δ 24 (dodatno) Δ 12 (dodatno)	2013 2018	DEM
Veriga HE na Spodnji Savi: HE Krško HE Brežice HE Mokrice	39 41 30	2013 2015 2018	HES
TE-TOL, plinsko-parna enota, SPTE Prva faza Druga faza	od 107 do 134 od 107 do 134	2015 2020	TE-TOL
TE Brestanica (plinska turbina)	153	2015	TEB
TE Trbovlje (nadaljnje izkoriščanje lokacije v energetske namene), opcije: plinsko parna elektrarna novi vir terciarne rezerve, plinske turbine	290 od 130 do 190	2015	TET
Veriga HE na Srednji Savi, I. faza: HE Suhadol HE Trbovlje HE Renke HE Ponoviče HE Kresnice HE Jevnica	43 35 36 68 29 29	2018 2020 2022 2024 2026 2028	HSE
ČE Kozjak	400	2018	DEM

2.3 Hidroenergetski potencial

Slovenija je glede naravnih surovin relativno revna država, saj ima v večjih količinah le lesno biomaso in vodo. Zato imamo bogato znanje in tradicijo pri gradnji hidroenergetskih objektov, kot tudi v proizvodnji pripadajoče strojne in elektrotehnične opreme.

Iz Preglednice 2 je razvidno, da imajo slovenski vodotoki ocenjen bruto potencial v višini 19.440 GWh/leto. To je teoretična vrednost, ki predstavlja celotno energijo slovenskih vodotokov v enem letu. Vse te energije ni možno izkoristiti, saj bi morali zajeti vso vodno količino. Energijo, ki bi jo lahko izkoristili predstavlja tehnično izkoristljiv potencial in znaša 9.145 GWh/leto. Od tega je ekonomsko upravičenega okoli 8000 GWh/leto.

Preglednica 2: Energetski potencial slovenskih rek (Kryžanowski in Rosina, 2012)

VODOTOK	BRUTO POTENCIAL	TEHNIČNO IZKORISTLJIV POTENCIAL	IZRABLJEN POTENCIAL	DELEŽ ENERGETSKE IZRABE
	[GWh/leto]	[GWh/leto]	[GWh/leto]	[%]
Sava z Ljubljanico	4.134	2.794	683	24,4
Drava	4.301	2.896	2.833	97,8
Soča z Idrijco	2.417	1.442	491	34,0
Mura	928	690	5	0,7
Kolpa	310	209	0	0,0
ostali vodotoki	7.350	1.114	284	25,5
skupaj	19.440	9.145	4.296	47,0

Skoraj v celoti je izkoriščen tehnično izrabiljiv potencial reke Drave, na kateri obratuje sklenjena veriga 8 elektrarn, z inštalirano močjo 600 MW in srednjo letno proizvodnjo 2656 GWh/leto. Velik pomen DEM predstavlja možnost prilagajanja proizvodnje v trapezu in zagotavljanje rezervne moči v primeru okvar v elektroenergetskem sistemu Slovenije (EES).

Na reki Soči obratujejo 3 večje hidroelektrarne HE Doblar, HE Plave in HE Solkan s skupno močjo na pragu 147 MW. V letu 2010 pa so dogradili črpalno hidroelektrarno Avče, moči 185 MW (turbinski režim), ki je pomembna zaradi neugodne strukture proizvodnih zmogljivosti v EES. V SENG načrtujejo še gradnjo HE Učja in nekaj manjših hidroelektrarn, medtem ko nadaljnja izraba reke Soče ni predvidena.

Edini aktualen vodotok v smislu nadaljnje gradnje večjih hidroelektrarn je reka Sava. Ta je v energetskem smislu razdeljena na tri odseke in sicer na zgornjo, srednjo in spodnjo Savo. V zgornjem toku reke obratujejo HE Moste, HE Mavčiče in HE Medvode. V spodnjem pa HE Vrhovo, HE Boštanj, HE Blanca in HE Krško. Načrtovani sta še HE Brežice in HE Mokrice. Za odsek srednje Save se pripravlja projektna in tehnična dokumentacija za gradnjo novih hidroelektrarn. Z njimi bo nastala veriga 17 hidroelektrarn, ki bo povezala vse tri odseke. Po dograditvi verige se bo moč povečala iz sedanjih 190 MW na 615 MW s srednjo letno proizvodnjo 2100 GWh, izkoriščenost potenciala pa se bo povzpela na 75 %.

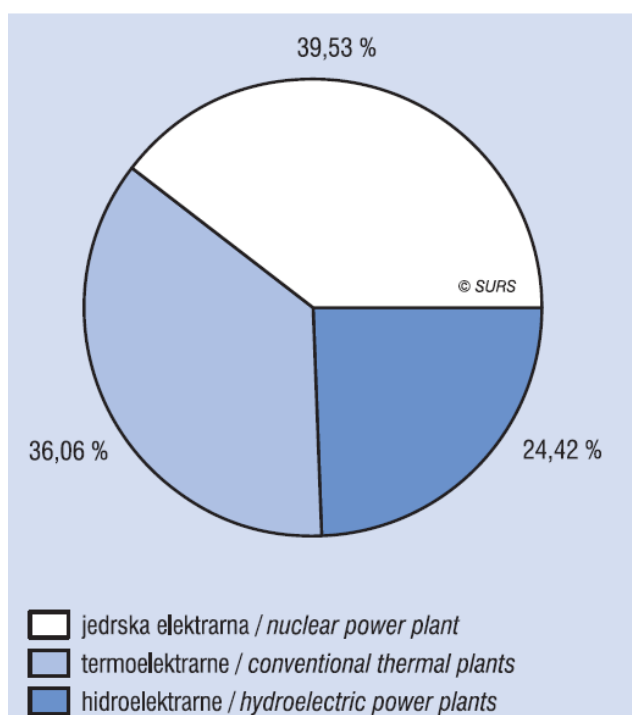
S pojmom male hidroelektrarne (mHE) označujemo hidroelektrarne z močjo do 10 MW inštalirane moči. Postavljajo se na manjših vodotokih, ki imajo zadostno količino vode in zadosten hidravlični padec. Tega lahko zagotovimo s pregrado ali z umetnim kanalom, ki dovaja vodo v hidroelektrarno. Ne povzročajo velikih posegov v prostor, z njihovo več namembnostjo (napajanje vodovoda, rekreacija, turizem), pa se poveča tudi družbena sprejemljivost. Delež proizvodnje mHE je v skupni proizvodnji slovenski HE je manjši od 10 %, kar pa ni nezanemarljiva številka. V akcijskem načrtu za

obnovljive vire energije za obdobje 2010 - 2020 je predvideno povečanje naložb v mHE v višini 35 milijonov evrov, s katerimi bomo lažje dosegli zastavljene cilje na področju OVE.

2.4 Proizvodnja in poraba električne energije

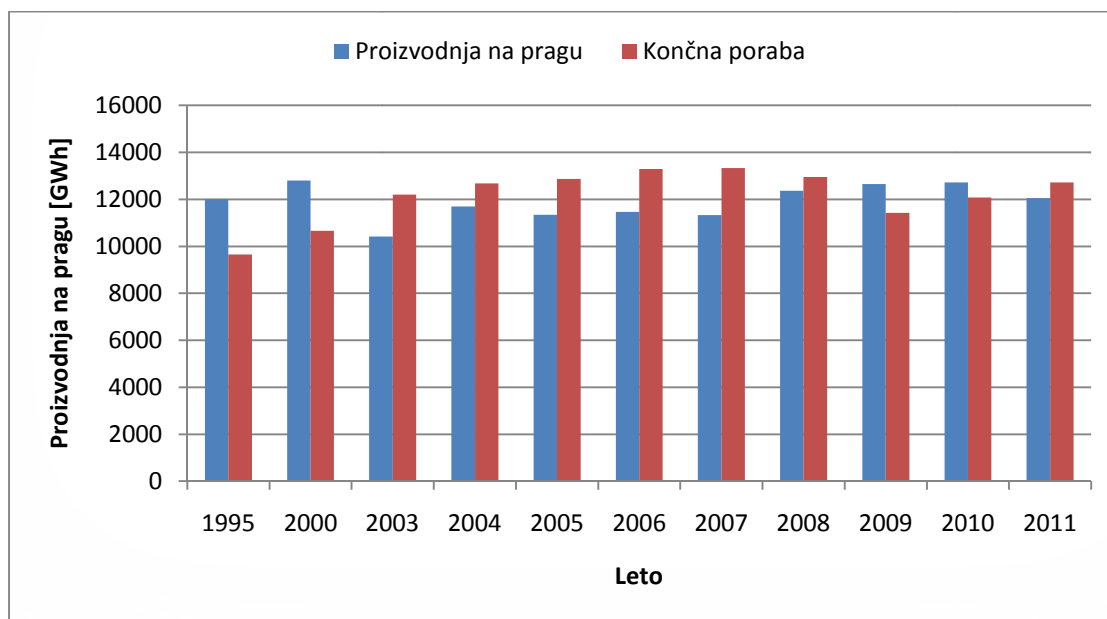
Dejanska moč objektov, vključenih v EES na dan 31.12.2011, znaša 3211 MW. V letu 2011 so skupaj proizvedli 14.932 GWh električne energije na pragu (SURS, 2012).

Slovenija je v dosedanem razvoju elektroenergetskega omrežja uspela doseči uravnoteženost primarnih virov za proizvodnjo električne energije (Slika 1). Tako naša proizvodnja temelji na uporabi premoga, jedrske in vodne energije.



Slika 1: Proizvodnja električne energije na pragu 2011 (SURS, 2012)

Iz Slike 2 je razvidno, da je poraba električne energije v zadnjem desetletju naraščala vse do leta 2007, ko je nastopila gospodarsko finančna kriza, ki je zmanjšala industrijsko proizvodnjo in gospodarsko rast, s tem pa tudi porabo. Vendar je ta padec kratkotrajen saj se le ta ponovno povečuje in je že skoraj na ravni izpred krize. V tem času pa rast proizvodnje ni enakomerno sledila rasti porabe, zato smo imeli deficit električne energije, ki smo ga pokrivali z uvozom iz sosednjih držav. S tem se je zmanjšala odpornost sistema na havarije in zanesljivost oskrbe z električno energijo. S padcem porabe smo pridobili nekaj časa, da zagotovimo nove proizvodnje objekte, s katerimi bomo dosegli, da zanesljiva oskrba z električno energijo ne bo odvisna le od uvoza. Zavedati se moramo, da so čezmejne prenosne zmogljivosti omejene in dolgoročno uvoz ni rešitev za zagotavljanje stabilnosti sistema.



Slika 2: Letna bilanca proizvodnje in porabe električne energije, 50% NEK (vir podatkov: SURS, 2012)

Za povezovanje z Evropsko energetsko interkonekcijo (UCTE) je potrebno da EES zadosti nekaterim pogojem in zagotovi aktiviranje ustrezne rezerve moči pri izpadu največjega agregata (preko 300 MW) ter razpolaganje z rezervo delovne moči za regulacijo frekvence in moči (preko ± 180 MW). EES mora iz svojih proizvodnih kapacitet zagotavljati lastne rezerve konične moči, rezervne moči za regulacije, rezerve jalove moči za regulacijo napetosti in črnega starta pri razpadih sistema (Kryžanowski, 2006).

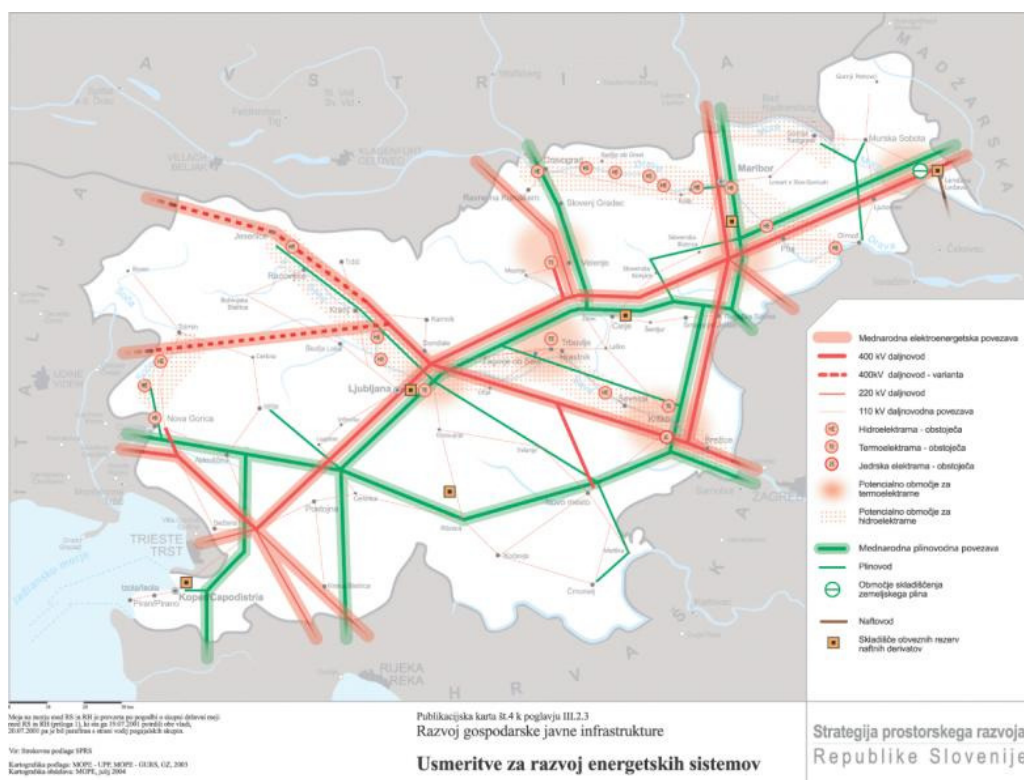
Skupaj z preobrazbo gospodarstva, kjer se zmanjšuje delež velikih porabnikov, se povečuje razmerje med vršno in pasovno obremenitvijo. Energijo v pasu zagotavljajo jedrske elektrarne, termoelektrarne in energija iz uvoza. Energija v vršnem delu diagrama (predvsem pa moč) pa naj bi bila po energetsko ekonomski logiki proizvedena čim bližje potrošnji.

3 PROJEKT IZGRADNJE HIDROELEKTRARN NA SREDNJI SAVI

3.1 Strategija prostorskega razvoja Slovenije

Z namenom smotrne rabe prostora je treba nove energetske sisteme za proizvodnjo električne energije v čim večji meri načrtovati na lokacijah obstoječih sistemov (Slika 3) in na degradiranih območjih proizvodnih dejavnosti, zlasti kot:

- naprave, ki povečujejo izkoristek obstoječih naprav;
- nove sisteme za proizvodnjo električne energije, ki nadomestijo obstoječe sisteme;
- nove sisteme za proizvodnjo električne energije, ki se umeščajo ob obstoječih in v čim večji meri izkoriščajo objekte in naprave obstoječih sistemov



Slika 3: Usmeritve za razvoj energetskih sistemov (OdSPRS, 2004)

Vodne zaježitve za proizvodnjo električne energije, je treba načrtovati tako, da v čim večji meri služijo različnim namenom, zlasti varstvu pred poplavami, namakanju kmetijskih zemljišč, turizmu in ribolovu (OdSPRS, 2004).

3.2 Koncesijska uredba

Za območje Srednje Save, ki obsega odsek Save od pregrade hidroelektrarne Medvode do načrtovane pregrade hidroelektrarne Suhadol je podeljena koncesija z Uredbo o koncesiji za rabo vode za

proizvodnjo električne energije na delu vodnega telesa reke Save od Ježice do Suhadola, Uradni list RS, št. 121/04 in Uredba o spremembah in dopolnitvah Uredbe o koncesiji za rabo vode za proizvodnjo električne energije na delu vodnega telesa reke Save od Ježice do Suhadola, Uradni list RS, št. 76/2011. Podpis koncesijske pogodbe je planiran sredi leta 2013. Strokovna podlaga za pripravo uredbe je bilo gradivo Vlade RS *Priloga h koncesijskemu aktu za izkoriščanje energetskega potenciala Srednje Save (med HE Medvode in HE Vrhovo)*, ki je opredelila izgradnjo HE na Srednji Savi kot izgradnjo sklenjene verige pretočnih hidroelektrarn, ki bodo povezale hidroelektrarne na zgornji Savi ter verigo hidroelektrarn na spodnji Savi v sklenjeno savsko verigo (Študija FGG in Geateh, 2007).

Državni prostorski načrt se pripravlja za tri hidroelektrarne na območju srednje Save in obsega približno 26 km dolg odsek med Litijo in Zidanim Mostom ter sega na območje občin Laško, Hrastnik, Trbovlje, Zagorje ob Savi in Litija. Direktor za prostor je dne 3.1.2012 objavil pobudo za pripravo državnega prostorskega načrta za HE Renke, HE Trbovlje in HE Suhadol na srednji Savi. V roku 30 dni je lahko zainteresirana javnost nanjo podala predloge, priporočila, usmeritve in mnenja (MOP DzP, 2012).

3.3 Kronološki pregled izgradnje hidroelektrarn na reki Savi

Porečje Save je v energetskega smislu razdeljeno na tri odseke: gornja, srednja in spodnja Sava. Ideja o energetskega izrabi Save ni nova in sega na začetek prejšnjega stoletja, ko so bile narejene prve študije za izgradnjo verige hidroelektrarn. Te so bile predvidene kot sklenjena veriga hidroelektrarn vzdolž celotnega toka Save, pri čemer so bile načrtovane čelne akumulacije v gornjem toku (HE Moste in HE Radovljica), ki bi s sezonsko akumulacijo zagotavljale obratovalno sposobnost verige v sušnem delu leta. Neposredno po vojni se je pričela izgradnja hidroelektrarn na gornji Savi z HE Moste (1952) in HE Medvode (1953). Leta 1986 je bila dograjena naslednja hidroelektrarna HE Mavčiče. Energetskega zanimiva je veriga pretočnih elektrarn od Medvod do državne meje pri Mokricah. Vlogo čelnih bazenov bosta prevzeli akumulaciji hidroelektrarn Mavčiče in Medvode, vlogo izravnalnih bazenov pa akumulaciji hidroelektrarn Brežice in Mokrice.

Gradnja verige hidroelektrarn na Savi je bila pričeta na odseku spodnje Save. Zaradi pritokov Savinje in Krke je ta del energetskega najbolj zanimiv. Hidroelektrarna Vrhovo, prva v nizu obratuje od leta 1993, hidroelektrarna Boštanj je pričela z obratovanjem leta 2006, hidroelektrarna Blanca leta 2009, HE Krško je v poskusnem obratovanju. Za HE Brežice je sprejet državni prostorski načrt in potekajo priprave na gradnjo. HE Mokrice je v različnih fazah postopkov umeščanja v prostor. Predvidoma bo veriga na spodnji Savi dokončana do leta 2018. (Kryžanowski, 2006)

3.4 Načrtovani objekti

Pri načrtovanju in zasnovi hidroenergetskih objektov se medsebojno prepleta več področij:

- energetika
- večnamenska raba prostora
- ekonomika in omejitve, ki jih narekujejo okolje in prostor

Ta izhodišča so bila uporabljena za ugotavljanje pogojev, pod katerimi je možno izrabiti razpoložljivo energijo reke Save. Cilj je najti ravnovesje med področji, ki so med seboj neločljivo povezana in se medsebojno dopolnjujejo.

Hidroelektrarne na srednji Savi bodo povezale stopnje na zgornji in spodnji Savi v sklenjeno verigo.

Na odseku je predvidenih 10 energetskih stopenj in se v geografskem smislu deli na območji Ljubljanske kotline in kanjonski del Zasavja (Slika 4).

Območje izvajanja koncesije in pogoji, pod katerimi se izvaja koncesija za rabo vode za proizvodnjo električne energije na delih vodnega telesa srednje Save podrobneje določa priloga h koncesijskemu aktu. Možnost obratovanja po principu pretočne akumulacije z dnevno izravnavo pretoka se bo povečevala s stopnjo zgrajenosti verige. Na začetku bodo elektrarne obratovale pretežno pretočno. S povečanjem števila stopenj se bo povečala sposobnost verige za proizvodnjo variabilne in vršne energije ter regulacijske moči.



Slika 4: Situacija verige HE na srednji Savi (prirejeno po Kryžanowski, 2006)

3.5 Etapnost izgradnje

Izgradnja verige na srednji Savi bo potekala po fazah (Preglednica 3).

1. faza predvideva izgradnjo treh hidroelektrarn (HE Suhadol, HE Trbovlje, HE Renke), ki so v postopku sprejemanja državnega prostorskega načrta in z vidika Nature 2000 niso problematične. Zato se pričakuje, da se bo gradnja začela po podpisu koncesijske pogodbe in sprejetju državnega prostorskega načrta.

2. faza predvideva izgradnjo naslednji treh hidroelektrarn (HE Ponoviče, HE Kresnice, HE Jevnica), ki imajo pozitivno okoljsko oceno z omilitvenimi ukrepi.

3. faza predvideva izgradnjo štirih hidroelektrarn (HE Zalog, HE Šentjakob, HE Gameljne, HE Tacen), kjer pa se trenutno zatika zaradi težav pri umeščanju v prostor na območju Nature 2000. Izgradnja le teh je zamaknjena po letu 2030.

Preglednica 3: Osnovni podatki o elektrarnah (Študija FGG in Geateh, 2007)

	Objekt	Padec [m]	Sr. pretok Save[m ³ /s]	Nazivni pretok [Qi]	Nazivna moč [MW]	Proizvedena energija [GWh]	Predviden rok
1	<i>HE Tacen</i>	16	98	260	32,6	89	Po letu 2030
2	<i>HE Gameljne</i>	13	100	260	26,5	70	
3	<i>HE Šentjakob</i>	8	100	260	18,4	44	
4	<i>HE Zalog</i>	8	101	260	14,3	44	
5	<i>HE Jevnica</i>	9	178	400	28,3	89	2028
6	<i>HE Kresnice</i>	9	178	400	28,3	90	2026
7	<i>HE Ponoviče</i>	19,5	180	400	67,9	212	2024
8	<i>HE Renke</i>	10,9	182	400	34,2	115	2022
9	<i>HE Trbovlje</i>	10,6	182	400	33,3	114	2020
10	<i>HE Suhadol</i>	13	182	400	40,8	145	2018

3.6 Bruto energetski potencial

Bruto energetski potencial srednje Save E_b , med gorvodnim in dolvodnim nivojem koncesije znaša **1185 GWh/leto** in je izračunan ob upoštevanju 40-letnega hidrološkega obdobja 1961-1990 iz povprečnih letnih pretokov reke Save. Sestavljen je iz izračunov v težiščnih profilih dveh zaporednih odsekov reke Save in sicer profila vodomernih postaj Šentjakob in Litija (Študija FGG in Geateh, 2007).

$$E_b = E_{b1} + E_{b2} = h.g.r.Q_{s1}.H_{b1}.T + h.g.r.Q_{s2}.H_{b2}.T \quad (1)$$

E_b	bruto energetski potencial območja srednje Save (GWh/leto)
E_{b1}	bruto energetski potencial območja srednje Save med spodnjo vodo HE Medvode in zgornjo vodo HE Jevnica pri pretoku $Q=0 \text{ m}^3/\text{s}$ (GWh/leto)
E_{b2}	bruto energetski potencial območja srednje Save med zgornjo vodo HE Jevnica in zgornjo vodo HE Vrhovo pri pretoku $Q=0 \text{ m}^3/\text{s}$ (GWh/leto)
$h = 0,8$	faktor možnega energetskega izkoriščenja vodnega padca
$g = 9,81 \text{ m/s}^2$	gravitacijski pospešek (m/s^2)
$r = 1000 \text{ kg/m}^3$	gostota vode (kg/m^3)
$Q_{s1} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$	srednji letni pretok VP Šentjakob (m^3/s)
$Q_{s2} = 177 \text{ m}^3/\text{s}$	srednji letni pretok VP Litija (m^3/s)
$H_{b1} = 45 \text{ m}$	bruto padec (m)
$H_{b2} = 72 \text{ m}$	bruto padec (m)
$T = 8760$	čas (število ur / leto)

3.7 Režim obratovanja

V nasprotju z nuklearnimi in pretočnim elektrarnami, ki zagotavljajo energijo v pasu, so hidroelektrarne na srednji Savi namenjene, da skupaj s termoelektrarnami pokrivajo variabilni del potreb po električni energiji. Sposobnost pokrivanja vršnih potreb verige hidroelektrarn na srednji Savi je predvsem posledica akumulacijskih sposobnosti gorvodnih čelnih hidroelektrarn (HE Mavčiče, HE Medvode), ki v času zmanjšane porabe električne energije zadržujeta del pretoka v akumulacijskih bazenih, z ohranjanjem bioloških razmer dolvodno. V času konic porabe električne energije pa spuščata akumulirano vodo za proizvodnjo električne energije. Razen HE Moste, ki omogoča tedensko izravnavo pretokov, je obratovanje hidroelektrarn na srednji Savi omejeno pri akumulacijskih sposobnostih na dnevno izravnavo. Ob tem pa hidroelektrarne na srednji Savi omogočajo tudi prilagajanje razmeram v omrežju z zagotavljanjem deleža potrebne moči za sekundarno regulacijo v EES.

Dnevno konično obratovanje verige hidroelektrarn na Savi je razdeljeno na dopoldanski in večerni del. Vrednost šestmesečnega pretoka na odseku med Mavčičami in Zalogram znaša povprečno okrog 50 m³/s. Akumulacijska bazena HE Mavčiče in HE Medvode imata razmeroma veliki prostornini, zato lahko oba ta dotok pri 0,43-metrski denivelaciji dvakrat dnevno pretvorita v dve uri trajajočo konico s pretokom 214 m³/s in enourno konico s pretokom 172 m³/s.

Pri tem je pomembno, da nižje ležeča tacenska akumulacija dobi regulirani pretok v dveh dnevnikih konicah po tri ure, pri tem pa nima dovolj prostornine, da bi izravnala vmesni dotok reke Sore. Ta se zato uporablja za zagotavljanje biološkega minimuma v strugi, za potrebe kajakaške proge v Tacnu in za potrebe odseka pri Litiji.

Obratovalni pretoki HE Tacen imajo podoben režim kot HE Medvode, saj gladina vode v akumulacijskem bazenu niha le v skladu z dotoki Save. Naslednji dve hidroelektrarni (Ježica in Šentjakob) imata tolikšen vmesni dotok, da ga je skupaj z obratovalnimi vodami iz Tacna pri denivelaciji okrog 0,4 m možno dvakrat dnevno pretvoriti v dvourno konico po 202 m³/s in dvourno konico po 242 m³/s. Naslednja stopnja v verigi je HE Zalog, ki ima tako majhen vmesni dotok, da je potrebno le manjše korigiranje pretoka skozi turbine, denivelacija pa je zanemarljivo majhna. Bolj kompliciran je nižje ležeči jevniški bazen, saj ima nalogo izravnavanja razmeroma velikega vmesnega dotoka Ljubljaniče in Kamniške Bistrice (skupaj okrog 49 m³/s). Instalirani pretok HE Jevnica je zato povečan na 400 m³/s, kar pa še vedno omogoča dvourno dopoldansko in štiriurno večerno obratovanje elektrarne s pretokom 380 m³/s in denivelacijo okrog 0,8 m. Podobna zgodba se ponovi tudi pri HE Vrhovo zaradi dotoka reke Savinje. Manjše dotoke na vmesnih stopnjah je možno korigirati podobno kot na HE Šentjakob oziroma HE Zalog. Posebno vlogo imata še izravnalna bazena v Brežicah in Mokricah, ki na dolvodni strani blažita razlike v pretokih, do katerih pride zaradi obratovanja hidroelektrarn (povzeto po IBE, 1988).

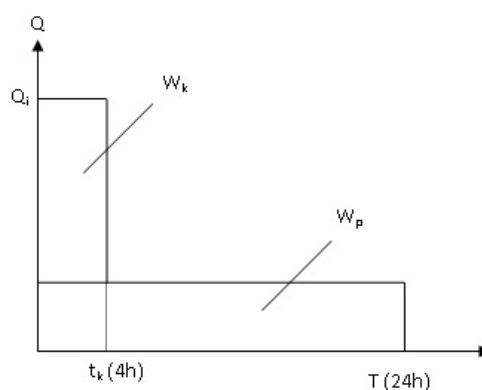
Reka Sava ima v srednjem toku relativno nizek padec, dobro vodnatost in velika nihanja v pretoku. Iz tega razloga je na srednjem odseku načrtovana izgradnja pretočnih elektrarn. Pretočne elektrarne delujejo pri relativno nizkem padcu in lahko le pri obratovanju v verigi, hranijo vodo do nekaj ur. Te elektrarne so vezane na trenutni pretok, kar v primerjavi z elektrarnami s tedensko ali mesečno akumulacijo omogoča ekonomsko manj ugodno izkoriščanje vodnega potenciala. Vseeno pa je možno z načrtovanimi elektrarnami izkoriščati vodni potencial v času višje cene energije v konici in s tem vodni energiji zagotoviti najvišjo dodano vrednost.

Načrtovan način izrabe energetskega potenciala srednje Save med hidroelektrarno Medvode in hidroelektrarno Vrhovo bo v sklenjeni verigi hidroelektrarn na reki Savi do hidroelektrarne Mokrice, omogočal obratovanje celotne verige po principu pretočne akumulacije z izkoriščanjem razpoložljivih

prostornin v dovoljenih mejah denivelacije bazenov. Pri optimizaciji verige HE se optimizacijski proces smatra kot iskanje takih moči HE, ki zagotovijo želeno moč celotne verige HE ob minimalni porabi vode. Optimizirana veriga HE bi imela večji odstotek energije, proizvedene v konici, kar bi vplivalo na velikost prihodkov verige elektrarn. Odstotek energije proizvedene v konici glede na proizvodnjo v pasu znaša 15 % - 30 %. Na to razmerje ima zelo velik vpliv predvsem velikost izkoristljive prostornine akumulacije. Šele po sklenitvi celotne verige elektrarn bo omogočeno polno načrtovano obratovanje hidroelektrarn po principu pretočne zaježitve in s tem optimalno izkoriščanje razpoložljivega potenciala tako za proizvodnjo električne energije, kot za pokrivanje konic ter v zadnjem času najbolj deficitarno energijo za regulacijo frekvence v sistemu. Tak režim nudi možnost prilagajanja proizvodnje zahtevanim dnevnim nihanjem porabe električne energije ter pokrivanju potreb po regulaciji frekvence. Zato je tudi najbolj pomembno, da je zgrajena celotna veriga v nizu, ki zagotavlja načrtovane efekte. Vsaka prekinitev gradnje samo ene vmesne stopnje pomeni spremembo načrtovane vloge verige v sistemu in znatno večje težave pri zagotavljanju obratovanja sistema. Delovanje verige se bo v prihodnosti še dodatno optimiziralo glede na njene specifične hidrološke in obratovalne parametre (Študija FGG in Geateh, 2007).

Lastnosti akumulacij:

- Dnevna izravnava pretokov - v enem dnevu lahko porabimo toliko vode, kolikor jo v teku dneva priteče (Slika 5)
- Velikost dotoka se med letom spreminja, z velikim razponom med Q_{\min} in Q_{\max}
- Inštaliran pretok Q_i je prilagojen srednjemu pretoku
- V primeru, ko bazen ni dovolj velik, se čas delovanja v konici ustrezno spremeni
- Veriga elektrarn v konici obratuje v taktu – skladno s čelnima elektrarnama Mavčiče in Medvode ob maksimalnem padcu. V preostalem delu dneva obratuje v pasu glede na dotok in polni akumulacijo
- Ob polnjenju akumulacij, se pretok reke Sore smatra kot ekološko sprejemljiv pretok (Q_{es}), ki se ga spušča do odseka pri Litiji, zaradi načrtovane derivacijske hidroelektrarne Ponoviče



Slika 5: Režim delovanja HE v pasu in konici (Študija FGG in Geateh, 2007)

3.8 Geološka zgradba in morfologija

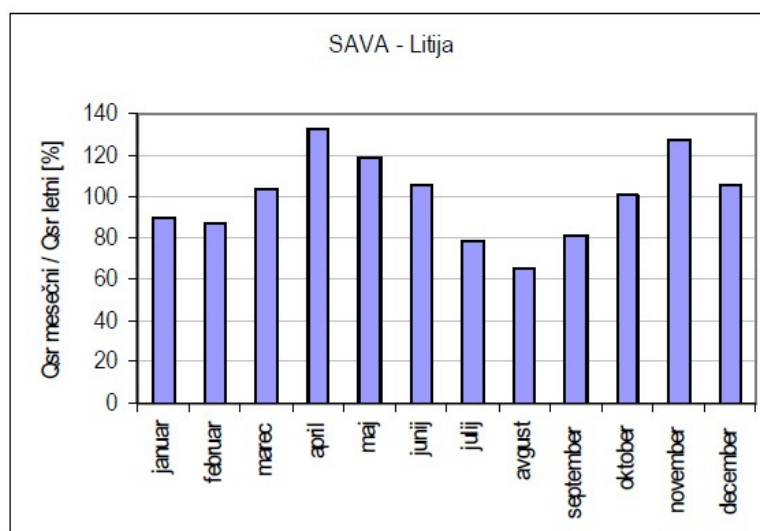
Obravnavano območje HE na Srednji Savi spada v dve pokrajinski enoti, Savsko ravan in Posavsko hribovje. Predvidene HE segajo na skrajni jugovzhodni del Savske ravni, na Ljubljansko polje, ki je del velike udorine, Ljubljanske kotline, kamor so reke v pleistocenu čez terciarne usedline nanesele ogromno gradiva. V ledenih dobah so v Ljubljansko kotlino segali ledeniki, ledeniške vode so nasule prod tudi do 100 m na debelo. Prod iz zadnje, würmske poledenitve je sipek in nesprijet, starejši pa je sprijet v konglomerat. Ponekod so v pleistocenu nastala jezera, njihove glinene in ilovnate usedline še danes kažejo obseg teh jezer. V prod so reke vrezale svoje doline s širokimi terasami, ki so v vzhodnem in južnem delu pokrajine najbolj široke in manj izrazite.

Ljubljansko polje je prepreženo s savskimi terasami in se podolžno vleče od Mednega proti vzhodu. Trdo sprijet konglomerat gleda izpod nizke prodne nasipine le ob ježah nekaterih teras, kjer so se ob Ljubljani naselile fužine in kasneje HE in papirnica pri Vevčah. S severne strani Ljubljansko polje zapirajo triasni apnenci in dolomiti na Šmarni gori in Grmadi ter v najvišjih delih Rašice in nižjega Soteškega hriba.

Posavsko hribovje je obsežna pokrajinska enota, ki jo Sava skoraj po sredini podolžno prereže s svojo globoko in ozko strugo. V reliefni zgradbi te enote se izrazito kaže skupina gub, poimenovane posavske gube. Nastale so ob gubanju in narivanju v srednjem miocenu, hribovje pa so v pliocenu in kvartarju oblikovali geomorfološki procesi, še posebej erozija, denudacija in zakrsevanje. Gube so sestavljene iz izbočenih kamninskih plasti (antiklinal) in iz kotanjasto usločenih kamninskih plasti (sinklinal). Zaradi številnih prelomov in narivov je v osnovi enostavna tektonska zgradba ponekod močno zabrisana in zato zapletena. Sava vstopa v Posavsko hribovje v bližini Dola pri Ljubljani. Njena dolina je sprva vrezana v slabo odporne permokarbonske skrilavce in peščenjake ter trše kremenove konglomerate. dolinsko dno je razmeroma ozko, v dolinska pobočja pa so vrezani ostanki širokih pliocenskih teras. Potem, ko reka preči nekoliko prostornejšo Litijsko kotlinico, se za naseljem Sava zareže v apneniške plasti severnega krila Litijske antiklinale. Po tesni in globoki soteski se nato prebija vse do Radeč, kjer se dolina na mladopaleozojskih kamninah ponovno razširi (Študija FGG in Geateh, 2007).

3.9 Hidrologija

Dolžina reke Save v Sloveniji znaša 221 km s Savo dolinko, njeno porečje pa obsega 10.764 km², to je 53 % deleža ozemlja Slovenije. Reka Save v srednjem toku preide iz snežno - dežnega, v dežno - snežni rečni režim, z letnim maksimum v spomladanskih in jesenskih mesecih in letnim minimumom v zimskih in poletnih mesecih (Slika 6).



Slika 6: Moduli odtoka za obdobje 1961-1990 za Savo na VP Litija (Kryžanowski et al, 2007)

Obravnavano porečje reke Save na njenem srednjem delu obsega 3711 km² in je dolgo 75,2 km. Reka Sava ima na obravnavanem odseku tri pomembnejše pritoke in sicer Soro, Kamniško Bistrico in Ljubljaničo.

Reka Sora se v reko Savo izlije tik pod pregrado HE Medvode. Je hudourniškega značaja in pogosto visoka reka z dolžino 51 km. Površina porečja je 636 km², njena rečna mreža pa je dolga 1285 km njen povprečni letni pretok ob izlivu v Savo pa znaša 20 m³/s. **Prav reka Sora je pomembna za optimizirano obratovanje verige, saj se bo pretok reke Sore uporabljal kot ekološko sprejemljivi pretok (Q_{es}) vzdolž verige na srednji Savi.** Predvsem je to pomembno za odsek pri Litiji, kjer bo zaradi načrtovane derivacije Ponoviče, Q_{es} zagotavljal biološki minimum in vizualno podobo vodnega telesa.

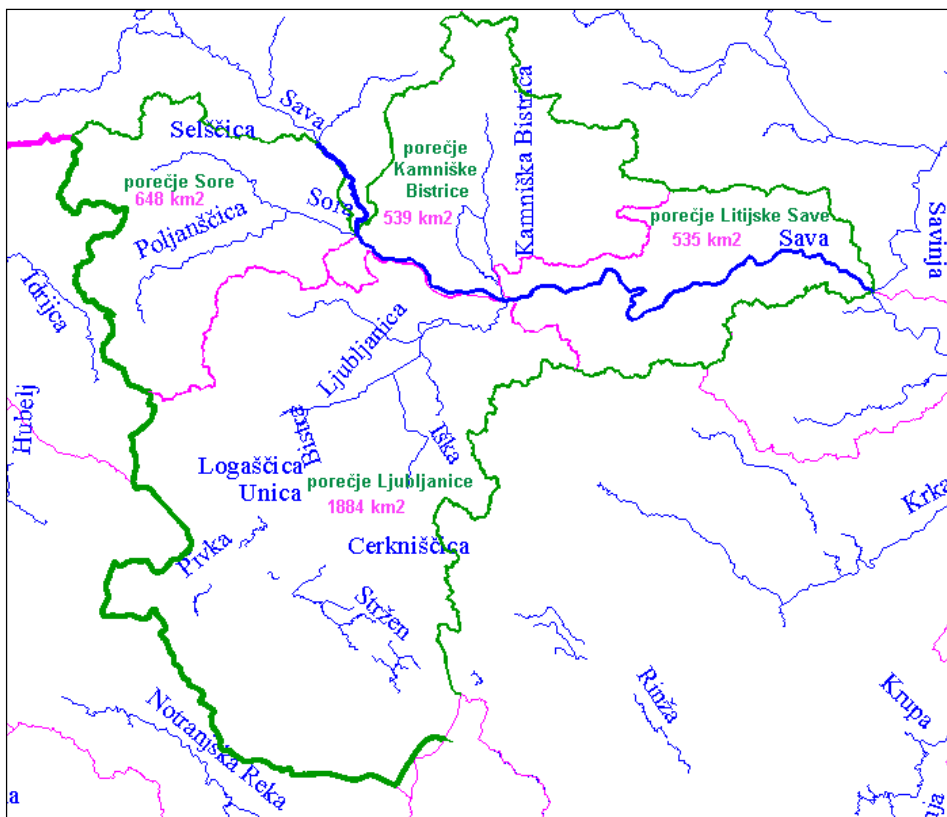
Kamniška Bistrica je 33 km dolga reka s 540 km² velikim porečjem (5 % porečja Save) in povprečnim pretokom 20,9 m³/sek.

Velikost porečja Ljubljaniče je po do sedaj opravljenih raziskavah 1884 km², kar pomeni slabo desetino površja Slovenije. Njeno porečje obsega velikost 18 % porečja Save, kar jo uvršča na 2. mesto po velikosti. Ljubljaniča je po obsegu porečja enakega velikostnega razreda kot Sava do

sotočja treh rek (Save, Ljubljanice in Kamniške Bistrice), ki meri 2292 km². Po sotočju pripada Savi kar 40 % deleža iz porečja Ljubljanice. Tako se prispevna površina reke Save po sotočju več kot podvoji in znaša 4715 km².

V območju Ljubljanskega polja dobiva Sava do Kamniške Bistrice in Ljubljanice le manjše pritoke. Večjih pritokov do sotočja s Kamniško Bistrico in Ljubljanico ni, tako da so spremembe v pretoku vode reke Save vzdolž odseka reda velikosti napake pri njihovem določanju. Zato lahko celoten odsek obravnavamo kot enovit s homogenimi hidrološkimi lastnostmi. Kot reprezentančno se za ta odsek privzame VP Šentjakob.

Na odseku med sotočjem Kamniške Bistrice in Ljubljanice s Savo do sotočja s Savinjo ni večjih pritokov, ki bi bistveno spreminjali odtočni režim. Med Zalogom in Dolskim dobi Sava krajše in manjše pritoke. Celoten odsek lahko obravnavamo kot enovit s homogenimi hidrološkimi lastnostmi. Kot reprezentančno se za ta odsek privzame VP Litija (Študija FGG in Geateh, 2007).



Slika 7: Prispevne površine srednje Save (Študija FGG in Geateh, 2007)

3.10 Pregradni objekti

Glede na zasnovo objektov na srednji Savi sta predvidena dva tipa hidroelektrarn:

- rečne elektrarne
- derivacijske elektrarne.

Razen HE Ponoviče, so vse elektrarne rečnega tipa. Pri rečnih elektrarnah je pogonski objekt sestavni del pregradnega objekta (blokovna shema), hidravlični padec pa predstavlja geodetska višina med gladino v akumulaciji in spodnjo vodo pod pregrado. Zasnova jezovne zgradbe mora omogočati učinkovito prevajanje visokih voda in plavljenje plavja ter plavin. Prelivni del mora biti oblikovan tako, da ohranja pretočni profil oziroma je treba rečno strugo še dodatno razširiti s prestavitvijo strojnice v breg. V kanjonskem delu reke Save (dolvodno od Litije) se pojavi problem pomanjkanja prostora, saj je na levem bregu Save omejitve železniška proga, na desnem pa zasavska cesta (Slika 8). Ponekod je struga reke tako ozka oziroma so rečni bregovi tako strmi, da ni dovolj prostora za izgradnjo treh agregatov na elektrarni poleg prelivnih polj, zato sta predvidena po dva agregata na vsaki elektrarni. Velikost agregata je zato sorazmerno visoka in s tem tudi poglobitev strojnice predvsem na odseku pod sotočjem z Ljubljano, kjer maksimalen pretok skozi turbino znaša 200 m³/s.



Slika 8: Idejna zasnova HE Suhadol (<http://www.ikb.si>)

Objekti vzdolž načrtovane verige so načrtovani s ciljem poenotenja tehničnih rešitev in racionalizacijo gradnje. Zato so podslapja, strojnice, hidromehanska in električna oprema poenotena za vse objekte. Razpisi za dobavo opreme so večjega obsega, s čimer lahko dosežemo boljše pogoje pri dobaviteljih. Kljub želji po racionalizaciji, pa je potrebno rešitve in detajle za vsako elektrarno preveriti in prilagoditi specifičnim razmeram na posamezni lokaciji (hidravličnim padcem, geološkim, prostorskim, hidravličnim in drugim odločilnim razmeram).

Pri postavitvi pogonskega in prelivnega dela je potrebno preučiti hidravlične *natočne-odtočne razmere*, da ne pride do motenj pri prevajanju velikih voda in nestacionarnih procesov, ki bi ogrozili rečne brežine. Oblikovanje natočnih in odtočnih razmer je treba obvezno preveriti s fizičnimi modeli. Velikost objektov in zasnova konstrukcij na posameznih lokacijah je pogojena z prostorskimi, terenskimi, hidrološkimi in hidravličnimi razmerami.

3.10.1 Jezovna zgradba s pretočnimi polji

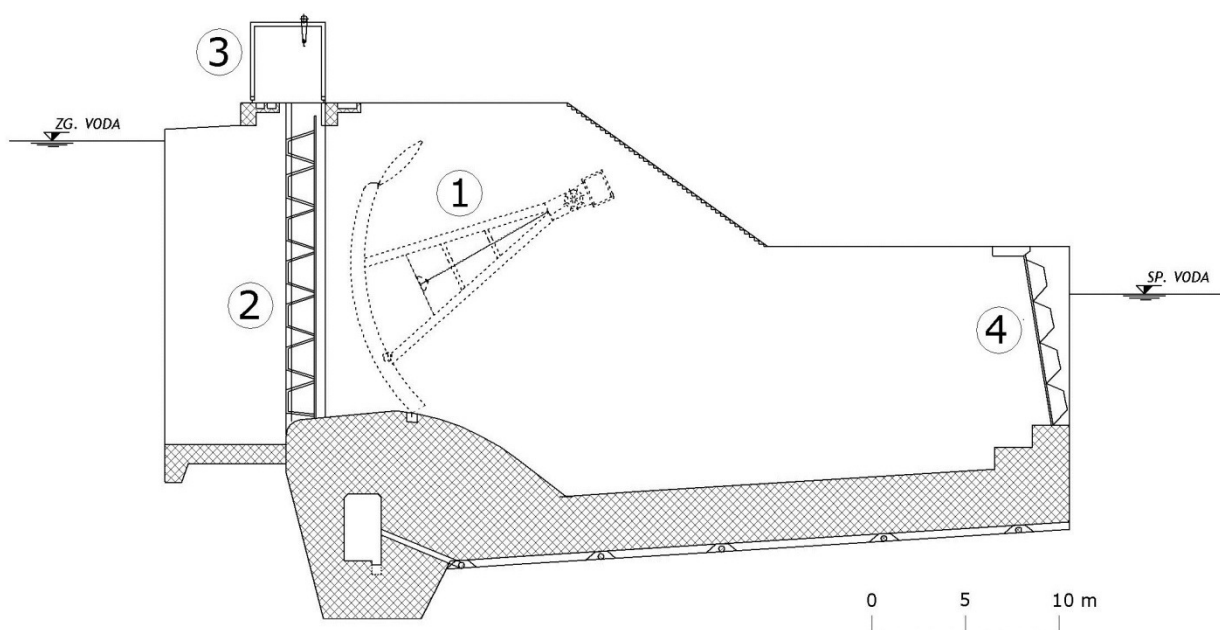
Jezovna zgradba z ustreznimi pretočnimi polji mora omogočati učinkovito prevajanje visokih voda ter plavljenje plavin in plavja.

Iz koncesijske uredbe izhaja, da morajo pretočna polja omogočati pravajanje visokih voda tako, da:

- pri stoletni visoki vodi Q_{100} niso povišane gladine v gorvodni polovici akumulacijskega bazena, glede na naravno stanje struge pred zaježitvijo
- pri tisočletni visoki vodi Q_{1000} ni presežena nominalna zaježitvena gladina zgornje vode v pregradnem profilu

Tipično prelivno polje posamezne HE (Slika 9) je opremljeno z naslednjo opremo:

- [1] Segmentna zapornica z zaklopko
- [2] Pomožna gorvodna zapornica
- [3] Portalni žerjav 2 x 100 kN s kleščami za vstavljanje in izvlačenje pomožne gorvodne zapornice
- [4] Dolvodne pomožne plavajoče zapornice



Slika 9: Prečni prerez tipičnega prelivnega polja (Študija FGG in Geateh, 2007)

3.10.2 Pogonski objekt

Na srednji Savi je glede na dobljene koncesijske vrednosti parametrov objavljenih v *Uradnem listu RS 121/2004* mogoče uporabiti dva tipa turbin. Za vodne padce večje od 10 m je glede na naravne danosti smotrno uporabiti vertikalne kaplanove turbine z betonsko spiralo in za padce manjše od 10 m horizontalne cevne turbine. Turbinska zgradba obsega ustrezno število in tip agregatov, natočno dotočni del, centralni del turbinskega trakta, kjer sta turbina in generator s pomožnimi napravami in odvodni del zgradbe. Ker je Sava vodnata reka z relativno nizkim padcem, ki teče v ozkem kanjonskem delu, so cevne turbine glede na ekonomski kriterij primernejše, vendar pa je zaradi pomena Savske verige za delovanje slovenskega EES-a izbrana kompromisna varianta, po kateri so v nekaterih HE nameščeni cevni, v drugih pa vertikalni agregati. Ker pri padcih manjših od 8 m vertikalne izvedbe niso primerne, so za vse načrtovane elektrarne v verigi s padci nad 8 m izbrani agregati vertikalne izvedbe, za elektrarne z nižjimi padci pa cevne izvedbe.

Turbinski trakt posamezne HE je opremljen z naslednjo opremo (Slika 10):

- [1] Plavajoča zavesa
- [2] Vtočne rešetke
- [3] Pomožna kotalna zapornica
- [4] Čistilni stroj z dvižno napravo
- [5] Difuzorske zapornice
- [6] Žerjav 2 x 300 kN za vstavljanje difuzorskih zapornic

Plavajoča zavesa: služi preusmeritvi in zadrževanju naplavin. Velik del plavljenega materiala plava na površini, kjer ga zadržuje plavajoča zavesa. Z odprtjem zaklopke radialne zapornice pretočnega polja se te naplavine odplavijo. Zasidrana je členkasto na brežini desnega brega v betonsko sidro in na jezu ob pretočnem polju v steber, kjer je pritrjena na plavajoči maček, ki se giblje po fiksnem vertikalnem jeklenem nosilcu. Taka plavajoča zavesa lahko sledi denivelaciji do 3,0 m.

Vtočne rešetke: njihova naloga je, da plavajočim lebdečim naplavinam preprečijo vstop v turbino. Nameščene bodo na turbinskih vtokih. Rešetke so fiksne izvedbe nagnjene pod kotom 75° in zapirajo turbinske vtoke. Vsak turbinski vtok je še razdeljen z vmesnim vertikalnim stebrom na dva enaka dela. Vmesni steber daje tudi oporo obema glavnima horizontalnima nosilcema rešetke. Vsaka od rešetk je opremljena z diferencialnim merilcem tlaka pred in za rešetko. V primeru razlike tlaka 0,5 m se vključi signal, ki opozori posadko elektrarne na nujnost čiščenja.

Pomožna kotalna zapornica: Pomožna kotalna zapornica se nahaja pred vtočnimi rešetkami, je sestavljena iz osmih elementov, ki se vlagajo s pomočjo polavtomatskih klešč in dvižne naprave na

čistilnem stroju 2 x 150 kN. Pomožna kotalna zapornica se zapira v mirno vodo. Zapornice so izvedene v enem setu in se selijo z elektrarne na elektrarno, kjer so predvidene tudi lokalne deponije.

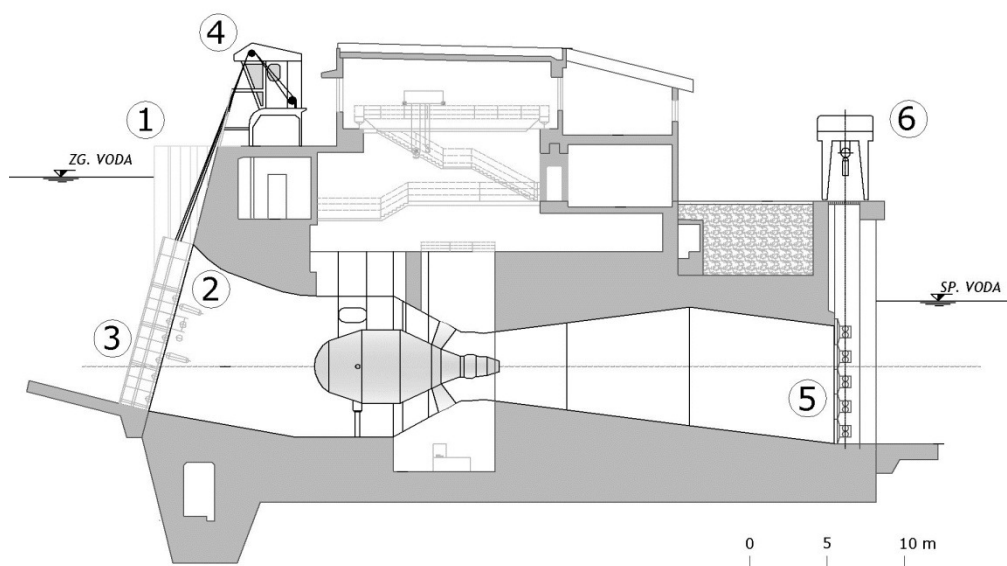
Čistilni stroj z dvižno napravo: Se bo uporabljal za čiščenje vtočnih rešetk in vlaganje vzdrževalnih kotalnih zapornic s pomočjo dvižne naprave. Pri vlaganju zapornic bo dodatno zavarovan pred prevrnitvijo s protivodilnimi kolesi, vodenimi s tirnico položeno na zgradbo strojnice.

Difuzorske zapornice: Za zapiranje odprtih turbinskih iztokov je namenjena tablasta zapornica. Zapornica je drsne izvedbe in opremljena s kolesi za bočno vodenje in proti vodenje. Tesnjenje je gorvodno s profilno notno gumo in bočno ter ploščato gumo spodaj na nožu. V zgornjem delu zapornice se nahajata dva polnilna ventila za izenačenje vodnih pritiskov, ki se aktivirata z žerjavom 2 x 300 kN.

Žerjav: Za vstavljanje difuzorskih zapornic je predvideno dvigalo nosilnosti 2 x 300 kN, ki se giblje po tirnicah. Žerjavna proga je sidrana v betonsko mostno konstrukcijo nad iztokom. Upravljanje žerjava je lokalno preko priklopne aparature na konstrukciji portala in oddaljeno radijsko vodeno. Hitrost dviganja je 2,5/0,4 m/min. ter hitrost vožnje dvigala 16/4 m/min., višina dviga $H \approx 19,0$ m (Študija FGG in Geateh, 2007).

3.10.2.1 Horizontalna cevna turbina

V zasnovi je to Kaplanova turbina s horizontalno osjo, pri čemer pa je celotni agregat nameščen v zaprtem jeklenem ohišju v pretočnem traktu in ga v celoti obteka vodni tok. Generator je umeščen v hruški v pretočnem traktu turbine, ki je fiksno pritrjena na vbetonirano spodnje rebro in predvodilnik (Slika 10).



Slika 10: Prečni prerez tipične strojnice z cevno turbino (Študija FGG in Geateh, 2007)

Hruška je dodatno pritrjena z dvema horizontalnima rebroma. Prenos aksialne sile turbine in teže generatorja skupaj s turbino se prenašajo preko spodnjega betonskega rebra, horizontalnih reber in predvodilnika. Sesalna cev turbine je zaradi hitrosti vode in hitrejše izdelave izdelana iz jeklene pločevine. Podaljšek sesalne cevi je narejen iz betona. Predvideno obratovanje turbin pogojuje možnost reguliranja vodilnika in gonilnika v odvisnosti od padca.

Za cevne variante se predvideva vgradnja dveh horizontalnih agregatov z dvojno regulirano turbino in generatorjem v hruški. Cevna izvedba agregata ima v primerjavi z vertikalno manjši premer gonilnika ter tako višjo vrtilno hitrost, manjše pretočne preseke in mere stroja, manjše razdalje med agregati, manjši tloris površine strojnice in plitvejši izkop. Zaradi tega je gradbeni in strojni del elektrarne cenejši.

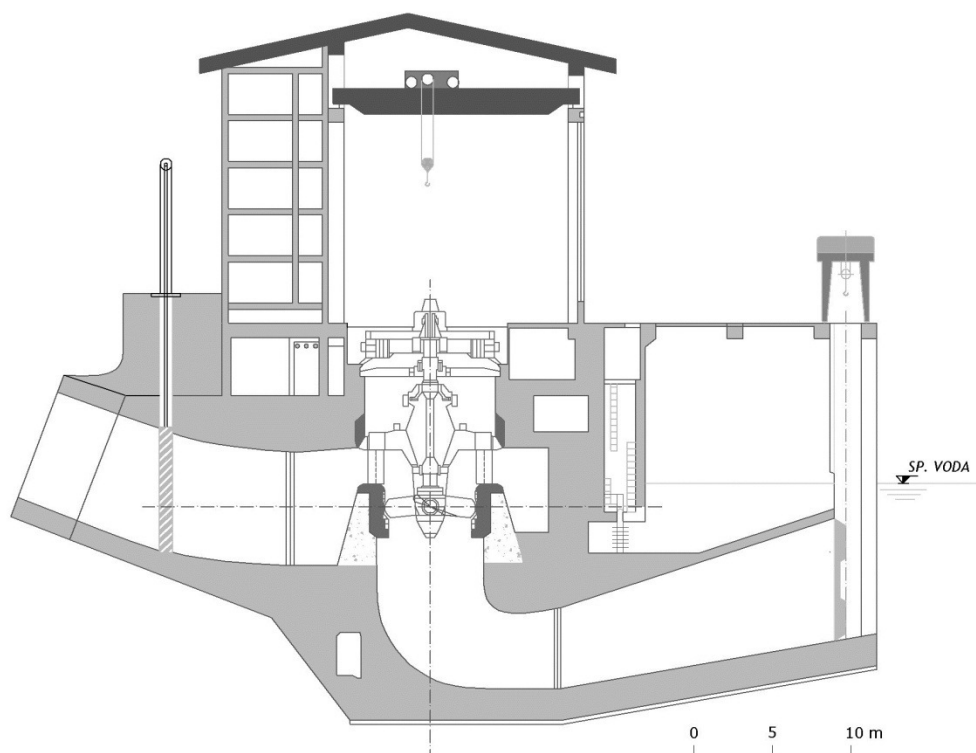
Negativne lastnosti:

- Visoka odzivnost generatorja daje nižjo rezervo statične stabilnosti
- Imajo nizko časovno konstanto (T_a okoli 1s), zaradi katere lahko ob motnji hitro pride do pobega generatorja
- Zaradi omenjenih obratovalnih lastnosti cevni agregati ne sodelujejo v primarni in sekundarni regulaciji frekvence in delovne moči.

Ob motnji v prenosnem omrežju in avtomatskem ponovnem vklopu lahko pride zaradi nizkih vztrajnostnih mas, značilnih za cevne agregate, do asinhronega režima obratovanja. Časovne konstante cevnih agregatov so za polovico in več manjše od vertikalnih. V primeru motnje odklopnik deluje in prekine zvezo med generatorjem in omrežjem. Tedaj ni več električnega protimomenta, ki bi uravnotežil mehanski moment, ki še naprej pospešuje gonilnik turbine in lahko pride do pobega turbine. Generator cevne izvedbe ima tudi znatno višje reaktance in zato več problemov s statično stabilnostjo. Prav zaradi zgoraj omenjenega je potrebno pri vključitvi v sistem posvetiti posebno pozornost regulaciji in zaščiti le-teh (Študija FGG in Geateh, 2007).

3.10.2.2 Vertikalna kaplanova turbina

Kaplanov gonilnik sestavljajo glava in lopatice, ki so gibljive in s tem povečujejo ali zmanjšujejo pretočni presek. Manevriranje z lopaticami turbine je sinhronizirano z lopaticami vodilnika – dvojna regulacija, ki omogoča optimalno delovanje agregata v širokem področju obremenitev (pretok-padec). Lopatice se med obratovanjem prilagajajo pretočnim razmeram in tako regulirajo moč turbine. Spirala ima traverzni obroč s predvodilnikom, ki skupaj s jekleno oblogo turbinskega jaška prevzema obremenitve agregata (aksialno silo turbine in težo generatorja s turbino). Sesalna cev turbine je zaradi hitrosti vode in hitrejše izdelave izdelana iz jeklene pločevine, prav tako vstopni konus in koleno sesalne cevi. Podaljšek sesalne cevi je narejen iz betona.



Slika 11: Prečni prerez strojnice HE Ponoviče s Kaplanovo turbino (Študija FGG in Geateh, 2007)

Vertikalne Kaplanove turbine imajo znatno boljši GD^2 in s tem večjo stabilnost, hkrati pa po znatnem številu predhodnih študij zahtevajo tudi od 30 – 40 % večjo širino in približno 20 – 30 % večjo globino strojnice od horizontalnih agregatov. Zaradi teh obratovalnih lastnosti ti agregati sodelujejo v primarni in sekundarni regulaciji frekvence in delovne moči (Študija FGG in Geateh, 2007).

3.11 Sistemske stroitve

Definicije posameznih sistemskih storitev (Orličnik, 2010):

- **primarna regulacija frekvence** je regulacija moči proizvodne enote za vzdrževanje ravnotežja med proizvedeno in oddano močjo v sekundnem obdobju, ki se odraža v uravnavanju frekvence
- **sekundarna regulacija moči in frekvence** je avtomatsko prilagajanje moči agregatov, ki ohranja želeno izmenjavo moči s sosednjimi regulacijskimi območji ter zmanjšuje preostalo odstopanje frekvence po delovanju primarnih regulatorjev
- **terciarna regulacija** je sprememba delovne točke agregata s posegom operaterja z namenom nadomeščanja izpadle proizvodne enote in sprostitve sekundarne rezerve moči
- **regulacija napetosti in jalove moči** ima za nalogo sprotno prilagajanje proizvodnje jalovih moči in s tem napetosti znotraj omejitev glede na spremembe obremenitev v sistemu
- **zmožnost zagona agregata brez zunanjega napajanja** je zmožnost ponovnega zagona in sinhronizacije agregata brez napajanja iz elektroenergetskega sistema

3.12 Energetski in visokovodni nasipi

Ob reki Savi bo potrebno zgraditi energetske nasipe za potrebe hidroelektrarn in visokovodne nasipe za varovanje zaledja pred 100 letnimi visokimi vodami.

Zahteve za določitev trase, višine in tehnično izvedbo nasipov izhajajo iz *Priloge h koncesijskemu aktu za izkoriščanje energetskega potenciala Srednje Save (Uradni list RS, št. 121/2004)*. Od tu izhaja, da se nasipi umestijo tako, da:

- ne omejujejo energetske rabe
- omogočajo pretok visokih pretokov Save (na posameznih odsekih je energetski nasip istočasno tudi protipoplavni nasip)
- ne ovirajo in ne omejujejo odtoka pritokov Save
- so po možnosti prilagojene krajini, kar bo opredeljeno v krajinski ureditvi

Upoštevati je treba varnostno višino nasipov nad nivojem zajezne gladine in sicer:

- v energetskem odseku gorvodno od pregradnega objekta hidroelektrarne 1,5 m nad koto zajezitve
- v vodnogospodarskih odsekih upoštevaje varnostno višino nad gladino stoletne vode Q_{100}

Nasipi morajo biti izvedeni tako, da so:

- stabilni
- dostopni za vzdrževanje
- ustrezno zavarovani v območju nihanja gladine:
 - pri obratovalnih pretokih elektrarne
 - pri visokih pretokih reke Save
- oblikovani na krajini sprejemljiv način in ustrezno sonaravno urejeni
- vodotesni v obsegu, ki zagotavlja stabilnost nasipa in še sprejemljivo izgubo vode
- v območju vodonosnikov vodotesni v obsegu, da bo zagotovljen ustrezen režim podzemne vode, kar je treba v bodočih strokovnih študijah še proučiti

Tudi v obravnavanem odseku načrtujemo izgradnjo nasipov, ki sledijo vsem pravkar podanim smernicam in zahtevam. Ker na območju Litije niso načrtovane visoke pregrade, gre v večji meri za protipoplavne nasipe s katerimi varujemo površine pred stoletnimi poplavnimi vodami.

3.13 Ureditve brežin

Zaradi izgradnje hidroelektrarn bo velik del struge reke Save pod vplivom obratovalne gladine. Zaradi bližine železnice in ceste, so tu potrebne klasične, težke vodarske zaščite z kamnometno oblogo in varovalnimi zidovi. Nekateri odseki vzdolž kmetijskih zemljišč so v skladu z naravovarstvenimi smernicami in so zaščiteni z lažjimi oblogami ter deloma ohranjeni v obstoječem stanju. S klasičnimi zaščitami je zavarovan odsek na levem in desnem bregu, na mestih načrtovanega energetskega nasipa. Kjer obratovalna gladina ne prestopi obstoječih bregov, ni predvidenega nobenega zavarovanja, ohranjajo se obstoječe brežine in s tem tudi zarast.



Slika 12: Primer ureditve brežin s kameno zložbo v betonu (<http://www.hess.si>) in sonaravne ureditve (<http://www.ribiska-druzina-radece.si/>)

3.14 Sistem vodenja hidroelektrarn

Elektrarne bodo popolno avtomatizirane in bodo obratovale brez posadke. Vodenje procesov bo potekalo daljinsko in sicer iz centra vodenja, ki bo skrbel za optimizacijo obratovanja verige hidroelektrarn na srednji Savi v povezavi z obratovanjem verige na celotni reki Savi. Z avtomatiko na elektrarnah bo možno zagotoviti najvišjo dodano vrednost.

Hidroelektrarne morajo imeti izdelane mehanizme za zagotavljanje varnega obratovalnega stanja daljinsko vodene HE, še posebej zaščito pred zalitjem. Ob nenačrtovanih dogodkih morajo ti mehanizmi zagotavljati varno obratovalno stanje, vsaj do prihoda dežurne ekipe.

3.15 Okoljska sprejemljivost

Porečje srednje Save nima značilnosti močno preoblikovanega vodnega telesa, vendar pa ekološko stanje vodnih teles ni dobro. Ker se HE načrtujejo na vodnem telesu, ki ni močno preoblikovano, je potrebno v okviru postopka za sprejemanje državnega prostorskega načrta in celovite presoje vplivov tega načrta, za vsako HE posebej utemeljiti spremembo hidro-morfološkega stanja vodnega telesa površinske vode v skladu z merili, ki jih je treba upoštevati za izjeme iz 4(7) člena Direktive 2000/60/ES (Žerdin, 2011).

Pri načrtovanju objektov na Savi so zahtevani posebni zaščitni ukrepi:

- zagotavljanje poplavne varnosti
- varovanje kvalitete in količine podtalne vode
- varovanja vodnega režima in rečne dinamike
- prehodnost jezovnih zgradb za vodne organizme,
- ohranjanje biološke raznovrstnosti in avtohtonosti habitatov
- ohranjanje in varovanje naravnih vrednot

3.16 Pozitivni učinki gradnje HE

Slovensko gospodarstvo je skoraj v celoti zmožno zagotavljati storitve in produkte za izgradnjo načrtovanih HE na področju gradbeništva, projektiranja in elektro ter strojne opreme. Tako pri izgradnji HE na spodnji Savi sodeluje preko 100 slovenskih podjetij, njihov skupni delež pa presega 90 % celotne investicije, kar dokazuje da imamo znanje, tradicijo in izkušnje na področju gradnje tako zahtevnih objektov (GZS, 2011).

Z izgradnjo verige HE nastopijo tudi pozitivni učinki:

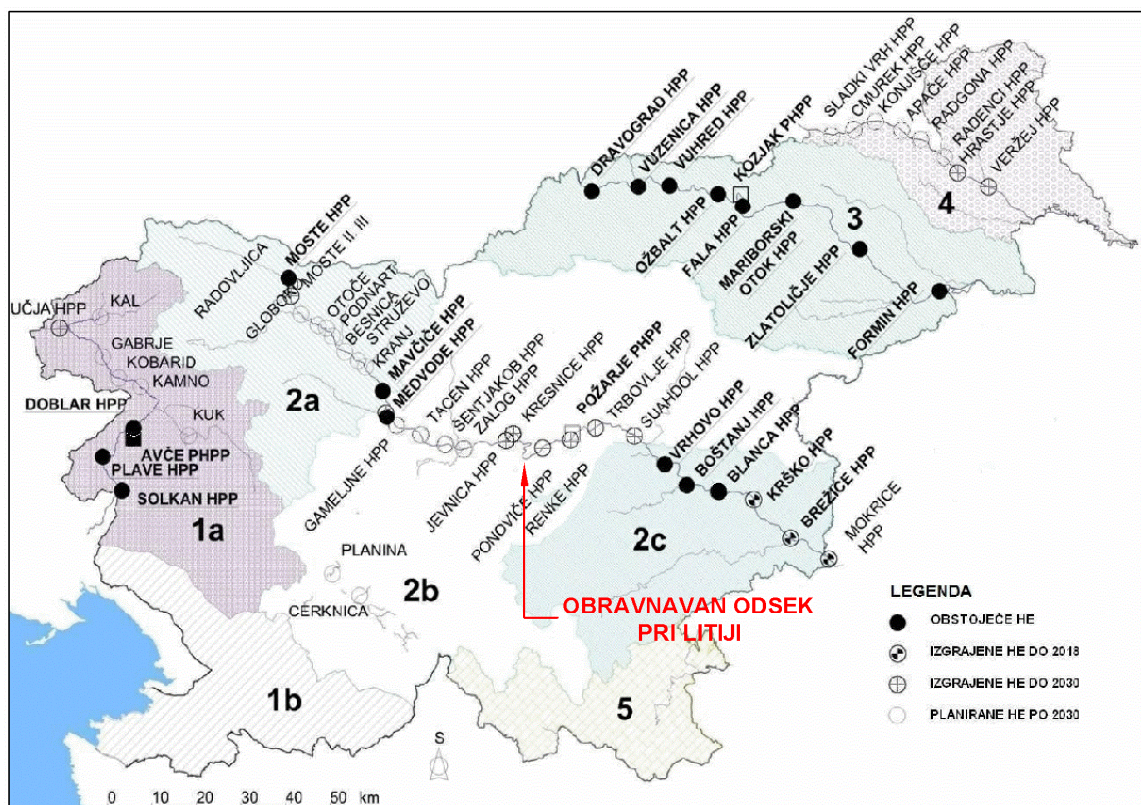
- povečana zaščita pred škodljivim delovanjem voda
- izboljšanje vodooskrbe
- čiščenje odpadnih voda
- ureditev prometnega in energetskega omrežja
- pozitivni družbeno razvojni gospodarski učinki
- namakanje kmetijskih površin
- razvoj turistično-rekreacijskih dejavnosti

Vsi posegi v rečni prostor morajo biti naravnani tako, da v ničemer ne poslabšuje stanja v vodotoku, temveč rešitve v čim večji meri predstavljajo kakovost in novo dodano vrednost v prostoru.

4 OBRAVNAVA ODSEKA PRI LITJI

4.1 Litija

Občina Litija leži v središču Slovenije, vzhodno od Ljubljane, v zahodnem delu Posavskega hribovja, ki z obeh strani obdaja reko Savo. Občina meri po površini približno 227 km², šteje 14.530 prebivalcev in ima 108 naselij. Samo mesto pa se razprostira na obeh bregovih reke Save in šteje približno 7.000 prebivalcev. Njeni hriboviti predeli so redko poseljeni, večja naselja so nastala v dolini reke Save, kjer potekajo večje prometnice in železnica. Občinsko središče je mesto Litija, ki se je razvilo iz nekoč pomembne brodarске postojanke na reki Savi. Po Valvazorjevem tolmačenju naj bi ime izhajalo iz latinskega imena litus, kar pomeni obrežje. Prvi most čez Savo je bil zgrajen leta 1852, leta 1952 pa je Litija dobila tudi mestne pravice (<http://www.litija.si/>).

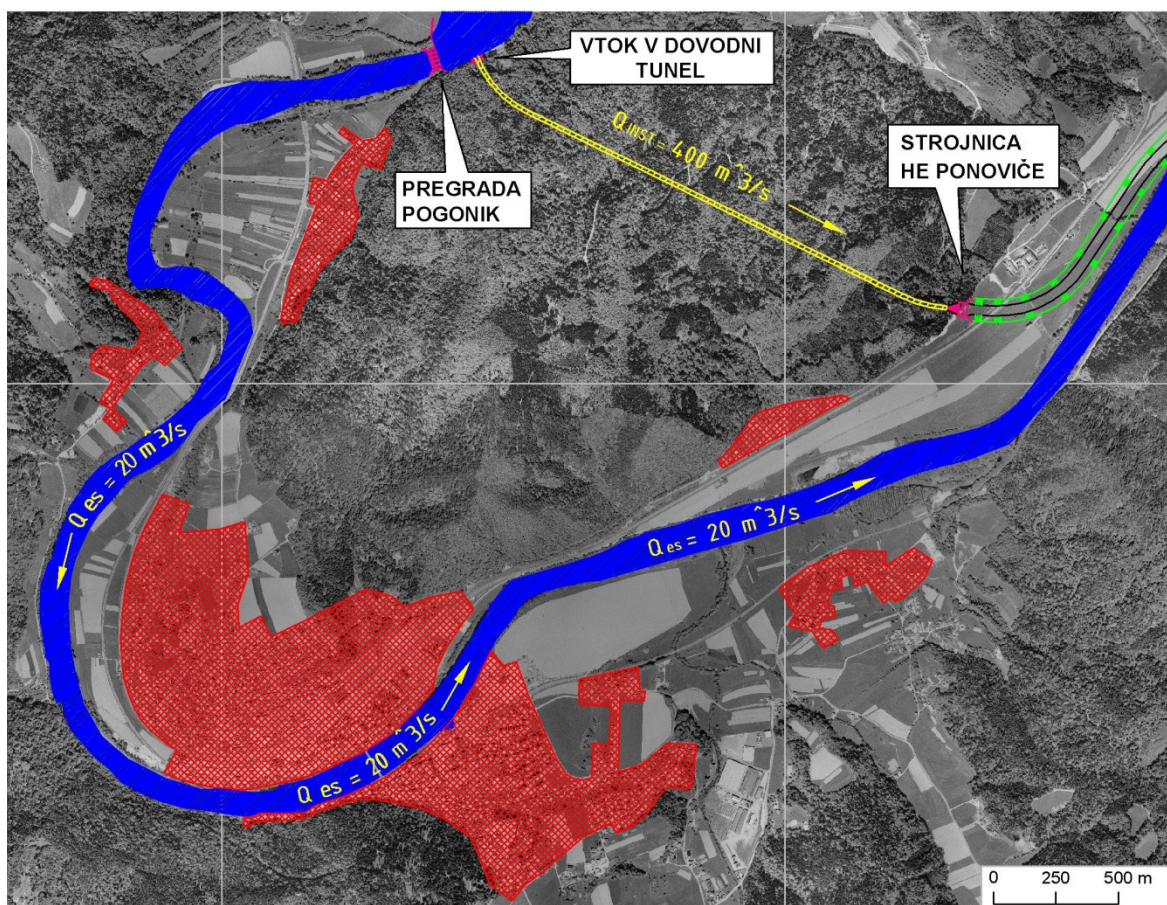


Slika 13: Energetske lokacije na velikih vodotokih (Kryžanowski in Rosina, 2012)

4.2 HE Ponoviče

Hidroelektrarna Ponoviče je zasnovana kot derivacijska, s pregradnim objektom v strugi Save v bližini gradu Pogonik na stacionaži 825 km, dovodnim rovom, strojnico pri Ponovičah in odvodnim kanalom (Slika 14). Pomembne spremembe bodo povzročene na širšem območju mesta Litija, saj bo izvedena preusmeritev precejšnjega dela toka Save skozi dovodni rov iz akumulacijskega bazena do strojnice v Ponovičah. S tem bosta pretok in vodostaj v strugi skozi Litijo močno zmanjšana, zato se lahko

pomembno spremeni značaj vodotoka in s tem vedute mesta ob Savi, spremenijo se lahko prostorska razmerja in podoba Litije, na kar opozarja in čemur odločno nasprotuje tudi lokalna skupnost.



Slika 14: Situacija obravnavanega odseka z vrisano HE Ponoviče

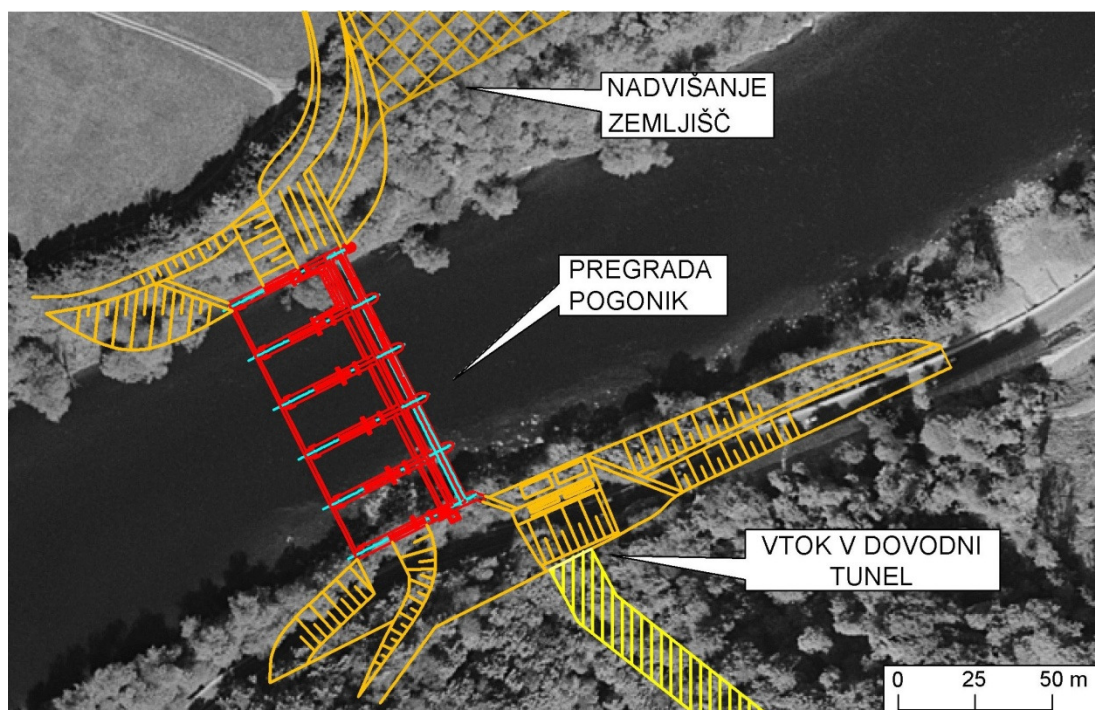
Hidroelektrarna je zasnovana kot derivacijska, saj urbanizacija Litije ne dopušča zgraditve jez u nizvodno od Litije in večjega dviga gladin Save v samem območju poselitev. Jez Pogonik je lociran kakih 700 m gorvodno od železniškega mostu preko Save nad Litijo. Derivacija je speljana skozi hrib Svibno in preseka litijski savski ovinek. Na koncu derivacije je situirana strojnica od koder bo potekal odprt odvodni kanal, ki se priključi na akumulacijo naslednje stopnje HE Renke.

Preglednica 4: Tehnične karakteristike HE Ponoviče

Objekt	Padec [m]	Sr. pretok Save[m ³ /s]	Nazivni pretok [m ³ /s]	Nazivna moč [MW]	Proizvedena energija [GWh]
HE Ponoviče	19,5	180	400	67,9	212

Akumulacija HE Ponoviče je na normalni koti 245.5 m in ima pri enometrski denivelaciji 1.455 hm³ koristne prostornine. Na jez u višine 9.0 m je pet pretočnih polj. Jez je temeljen na nepreperelem

glinenem skrilavcu in peščenjaku. Tik ob jezui je na levem bregu vtočni objekt za dovodni tunel, premera 15.0 m in dolžine 2150 m (Slika 15). Na koncu tunela je situirana strojnica v kateri sta predvidena dva agregata. Celoten tunel poteka skozi permokarbonski skrilavev in peščenjak. Odvodni kanal je trapezne oblike s širino dna 40 m in nagibom brežin 1:2,5. Derivacija poteka skozi karbonske skrilavce, na katerih je temeljena tudi strojnica. Neto padec znaša 18.77 m, kar daje pri inštaliranem pretoku $400 \text{ m}^3/\text{s}$, moč 63.0 MW. Ob jezui je načrtovana 1200 m dolga tesnilna zavesa. Trasa obstoječe ceste na levem bregu Ljubljana – Litija je prestavljena na dolžini 1700 m. Na desnem bregu pa je prestavljena pot ob železnici v dolžini 1400 m in izvedeno zavarovanje železnice v dolžini 650 m. Preko odvodnega kanala je izveden 150 m dolg most za dostop do pogonskega objekta. Za zagotavljanje ekološko sprejemljivega pretoka na odseku struge Save skozi Litijo je predvidenih $20 \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 15: Pregrada Pogonik z vtokom v dovodni tunel (Študija FGG in Geateh, 2007)

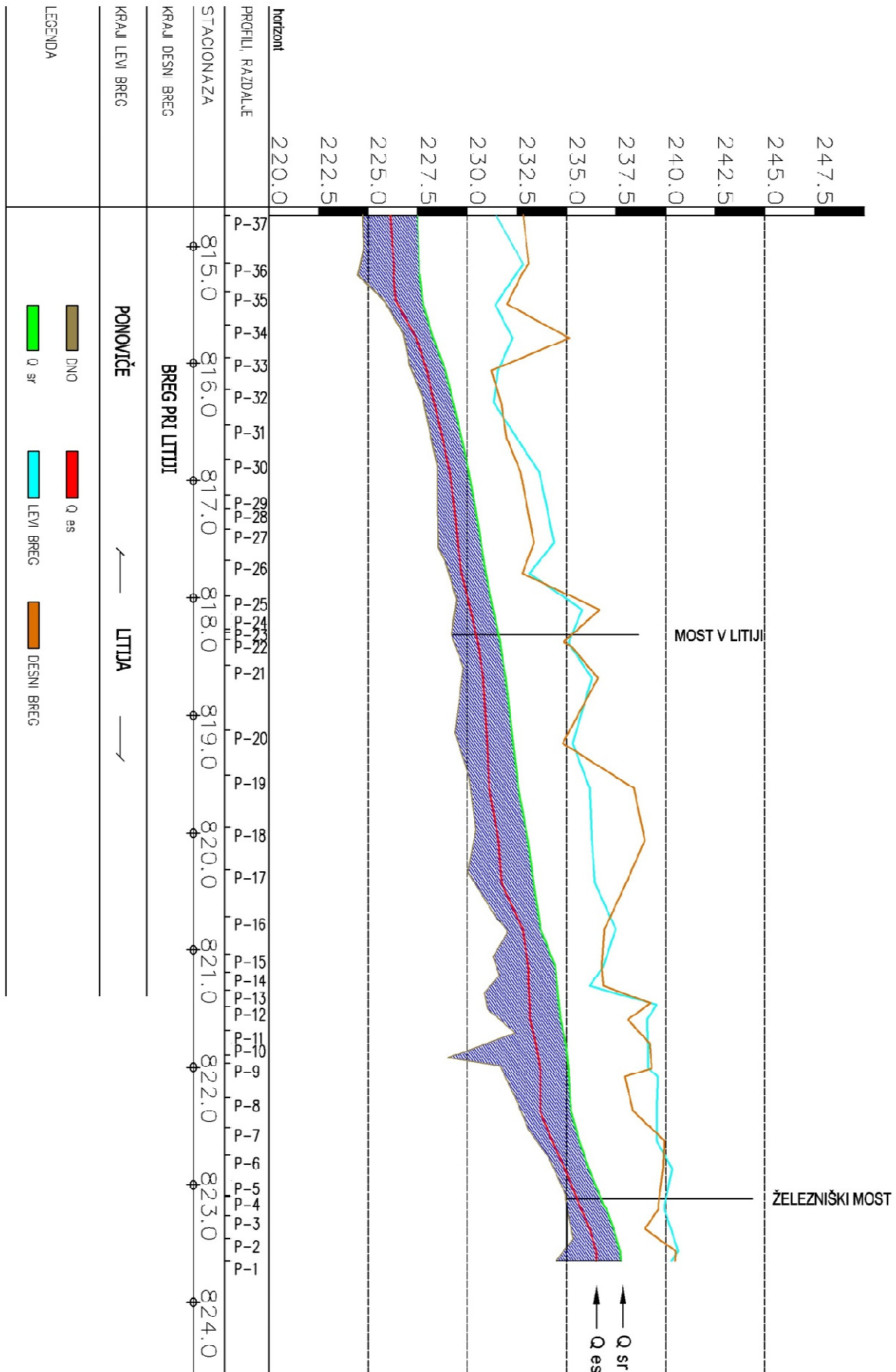
Preusmeritev toka Save skozi rov povzroči zmanjšanje pretoka in vodostaja v savski strugi skozi Litijo. Z ustreznimi tehničnimi ukrepi bo treba preprečiti poslabšanje izdatnosti in kakovosti podzemne vode v vplivnem območju črpališča za Litijo tudi v primeru zablatenja savske struge. Lokacija strojnica HE Ponoviče je predvidena pod gradom Ponoviče na savski terasi, ki jo sestavlja zgoraj nekaj metrov debela plast peska, pod njim pa plast rečnega proda neznane debeline. HE Pogonik zahteva velike spremembe v rabi prostora in v prostorski sliki območja gorvodno od pregrade. Obsežne površine so poplavljenе in trajno izvzete iz kmetijske rabe, na okoliških zemljiščih pa se utegnejo pojaviti tudi posredni vplivi (npr. dvig podtalnice), zato so potrebni obsežni ukrepi za

nadomestilo trajno izgubljenih zemljišč in za vzpostavitev ponovne kmetijske pridelave, kjer bi bila ta zaradi posegov sicer okrnjena. Na lokaciji gramoznice pri Hotiču, črpanje proda ob izgradnji akumulacije Ponoviče ni več mogoče, je pa smotrno oblikovanje nadomestnega habitata kot sekundarnega biotopa – mokrišča.

Umestitev pregrade v naravni prostor Save povzroči spremembo v funkcionalnosti obstoječih ureditev, zato je treba zagotoviti prehodnost pregrade za peš in kolesarski promet in za kmetijsko mehanizacijo. Načrtovani ukrepi povzročijo več tangenc z državnimi in lokalnimi cestami in železniško progo ter z elektroenergetskim omrežjem, zato so potrebni številni tehnični ukrepi, izvedbe križanj in prestavitve vodov in naprav (Študija FGG in Geateh, 2007).

4.3 Hidravlični model obstoječega stanja

Če želimo primerjati obstoječe in načrtovane ureditve, moramo najprej opisati obstoječe stanje. Za obravnavan odsek smo izdelali računski hidravlični model obstoječega stanja v programu HEC-RAS, ter ga kasneje dopolnili z načrtovanimi ureditvami. Podatki o prečnih profilih so pridobljeni iz študije *Hidravlični model gladin v sedanjem in bodočem (zajeznem) stanju za odsek srednje Save med HE Medvode in HE Vrhovo ter v fazi gradnje (Četina, 2007)*. Priloga A 1 prikazuje situacijo prečnih profilov, ki smo jih uporabili v računskem hidravličnem modelu. Koeficient hrapavosti rečne struge je predpostavljen z vrednostjo 0.034, kar približno ustreza strukturi rečne struge na obravnavanem odseku. Koeficient hrapavosti na poplavnih območjih je večji in znaša 0.08, predvsem zaradi goste zaraščenosti brežin. Model smo dopolnili z dvema mostnima konstrukcijama in sicer s cestnim mostom v Litiji in železniškim mostom gorvodno od Litije. Rezultat modela je predstavljen na Sliki 16 kot vzdolžni profil obravnavanega odseka z vrisanim potekom gladin pri različnih pretokih. Na vzdolžnem profilu odstopa prečni profil z oznako P-10, kjer je dno izrazito nižje od sosednjih profilov. Omenjeni profil leži na ovinku reke Save pred vstopom v Litijo. Dopuščamo možnost, da je prišlo do napake pri meritvi prečnega profila vendar smo zaradi pomanjkanja profilov uporabili omenjeni profil pri nadaljnjem modeliranju. Na vzdolžnem profilu smo označili levi in desni breg, ki predstavljata mejo med osnovno strugo in poplavnimi območji. Označeni so tudi kraji na levem in desnem bregu, kar nam omogoča boljšo prostorsko predstavbo pri ogledu vzdolžnega profila. Na profilu je lepo razvidna primerjava gladin pri srednjem letnem pretoku $Q_{sr} = 170 \text{ m}^3/\text{s}$ in ekološko sprejemljivem pretoku $Q_{es} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$. Ti gladini nam bosta pri nadaljnjem obravnavanju odseka z novimi ureditvami omogočila primerjavo med pretočnim režimom v obstoječem stanju in pretočnim režimom po izvedenih ukrepih za dvig gladine.



Slika 16: Vz dolžni profil obravnavanega odseka

4.4 Problematika obravnavanega odseka

Priloga h koncesijskemu aktu za izkoriščanje energetskega potenciala Srednje Save je opredelila informativen opis in prikaz predvidenih hidroenergetskih stopenj. Iz omenjene priloge sledi, da bodo pred dokončnimi odločitvami o načinu energetske izrabe Srednje Save izvedene še obširne raziskave zaradi **uskladitve različnih ključnih interesov** v prostoru. Z uskladitvami s tehničnega in prostorskega vidika želimo doseči čim boljše umestitev objektov v prostor in delno zmanjšanje vplivov na okolje ob hkratni optimalni izrabi vodne moči in ugodnejših tehničnih značilnostih. Na obravnavanem odseku je predstavljenih več zahtev in problemov.

Izgradnja derivacijske hidroelektrarne Ponoviče močno spreminja pretočni režim reke Save v obstoječi strugi. Pri nizkih in srednjih letnih pretokih po obstoječi strugi teče ekološko sprejemljivi pretok, ki predstavlja le nekaj procentov skupnih pretokov. Pri visokih vodah pa teče po strugi še vedno glavna skupnega pretoka. Hkrati pa moramo upoštevati izpad obratovanja HE Ponoviče, ki povzroči, da se v strugi hipno pojavi dodatni inštalirani pretok $400 \text{ m}^3/\text{s}$. Nizki in srednji letni pretoki so torej zmanjšani na ekološko sprejemljiv pretok $Q_{es} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$, medtem ko visokovodni pretok ostaja nespremenjen.

4.4.1 Zahteve lokalne skupnosti

Obravnavani problem pri HE Ponoviče je preusmeritev precejšnjega dela toka Save skozi dovodni rov iz akumulacijskega bazena do strojnice v Ponovičah. S tem bosta pretok in vodostaj v strugi skozi Litijo močno zmanjšana (ohranja se le ekološko sprejemljivi pretok $Q_{es} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$), zato se lahko pomembno spremeni značaj vodotoka in s tem veduta mesta ob Savi (Slika 17). Zaradi zmanjšane pretoka reke Save po obstoječi strugi se zmanjša širina osnovne struge in s tem omočenost rečnega profila. Sava izgubi svoj videz vodnate reke in se spremeni v reko z vodnatostjo pri ekološko sprejemljivem pretoku. Pomisleki in zahteve lokalne skupnosti, utemeljene in prepoznane, so bile predstavljene v javni razpravi ob gradnji hidroelektrarn na srednji Savi.



Slika 17: Struga reke Save pri pretoku $Q_{es} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$

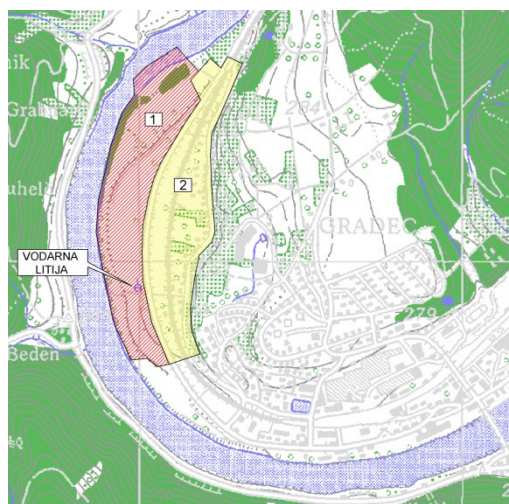
Lokalna skupnost je smernice in usmeritve za HE Ponoviče podala v dokumentu *Smernice in usmeritve Občine Litija za načrtovanje prostorskih ureditev k državnemu prostorskemu načrtu za HE Renke, HE Trbovlje in HE Suhadol na srednji Savi (Krofl et al, 2012)*.

Pod točko 5 je zapisano, da Občina Litija podaja naslednje usmeritve in zahteve:

- Pri pripravi DPN je potrebno še enkrat preučiti umestitev nadaljnje HE Ponoviče
- Zaradi zmanjšane pretoka po obstoječi strugi reke Save, ki povzroči izgubo vodnega lica, se spremeni podoba Litije, kar ni dopustno
- Občina Litija predlaga, da se namesto načrtovane HE Ponoviče preuči umestitev dodatne pretočno akumulacijske HE med Litijo in Kresnicami
- Pri pripravi DPN je potrebno izdelati strokovne podlage, ki bodo prikazale oz. predstavile celovite rešitve proti poplavne zaščite naselij Ponoviče, Sava, Spodnji Log in Renke ob upoštevanju kote stoletnih voda
- Na obeh bregovih reke Save je v ta namen potrebno izdelati strokovne podlage za zaščito teh naselij pred visokimi vodami in podtalnico za zaščito pred poplavami – 100 letnimi visokimi vodami, prav tako je potrebno pred poplavami do višine 25 letne visoke vode zaščititi kmetijske površine.

4.4.2 Oskrba s pitno vodo

Pomemben razlog za ureditev odseka je posledica znižanja gladine reke Save in sicer padec gladine podtalnice v vodonosniku. To pomembno vpliva na vodarno Litija, ki se nahaja na levem bregu reke Save, tik pred vstopom v mesto. Vodarna je glavno črpališče pitne vode za mesto Litija in okoliške kraje, zato zmanjšana izdatnost vodne vrtnice ni sprejemljiva. Pomembno je načrtovati vse potrebne ukrepe, s katerimi bomo ohranili ali izboljšali izdatnost vodonosnika in s tem izboljšali vodo oskrbo Litije. Slika 18 prikazuje prvi in drugi vodovarstveni pas na levem bregu reke Save.



Slika 18: Vodovarstveni pasovi v Litiji (M 1:25 000)

4.4.3 Zaraščanje in zaplavljanje struge

V vseh dosedanjih razpravah in študijah ni bila obravnavana problematika zaraščanja in zaplavljanja obstoječe struge, ki se bo zgodila zaradi spremenjenega pretočnega režima. Dober primer tovrstnih težav je na reki Dravi, kjer je po izgradnji kanalskih hidroelektrarn (HE Zlatoličje in HE Formin), zaradi nezadostnega vzdrževanja, prišlo do zaraščanja in zaplavljanja stare struge. Zaradi bistveno spremenjenega hidrološkega režima je odsek rečne struge od Maribora (Meljski jez) do Ptuja (akumulacija Ptujsko jezero) in od jezua v Markovcih do Zavrča (Slika 19), podvržen postopnemu zaraščanju in zaplavljanju, kar povzroča erozijo, upadanje pretočne sposobnosti in povečanje poplavne ogroženosti. Razmere se iz leta v leto poslabšujejo zaradi nezadostnega vzdrževanja struge.

Zaraščanje in zaplavljanje struge Drave je v preteklih letih močno zmanjšalo pretočni prerez, zvišalo gladine visokih vod in povečalo erozijsko ogroženost bregov. V letu 1997 je bilo z novo hidrološko študijo dodatno ugotovljeno, da so merodajne visoke vode precej višje, kot je veljalo pred tem, izkazalo se je da nekdanja 100-letna visoka voda predstavlja dejansko le visoko vodo s približno 10-letno povratno dobo.



Slika 19: Zaraščena in gola prodišča v stari strugi reke Drave pod pregrado Markovci (M 1:25000)

Struga Drave je bila pred izgradnjo elektrarn široka najmanj 100 do 120 m in je prevajala približno vsakoletne visoke vode. V sedanjem stanju je ponekod široka le še 30 do 45 m, zato prihaja do obsežnih poplav, gladine visokih vod so približno 1 m višje kot nekoč, bistveno višje so tudi hitrosti vodnega toka, kar povečuje erozijsko ogroženost v celotnem poplavnem prostoru, tudi na kmetijskih zemljiščih na robu le-tega. Zaradi verige elektrarn je bistveno zmanjšana prodonosnost, zaraščanje in

oženje struge pa povzroča poglobljanje struge, kar skupaj z nižjimi vodostaji večji del leta povzroča padec gladin podtalnice. Redka še ohranjena gola prodišča se zaraščajo, odvisno od njihove zrnastostne strukture in prisotnosti hranil in vode; tista iz grobih prodnikov počasneje, tista iz bolj finih frakcij pa hitreje. Ob povečanih vodostajih se sipine še povečujejo, ker se nanjo nalaga vedno več drobnih frakcij in humusa (Suhadolnik, 2007).

4.5 Upoštevani kriteriji

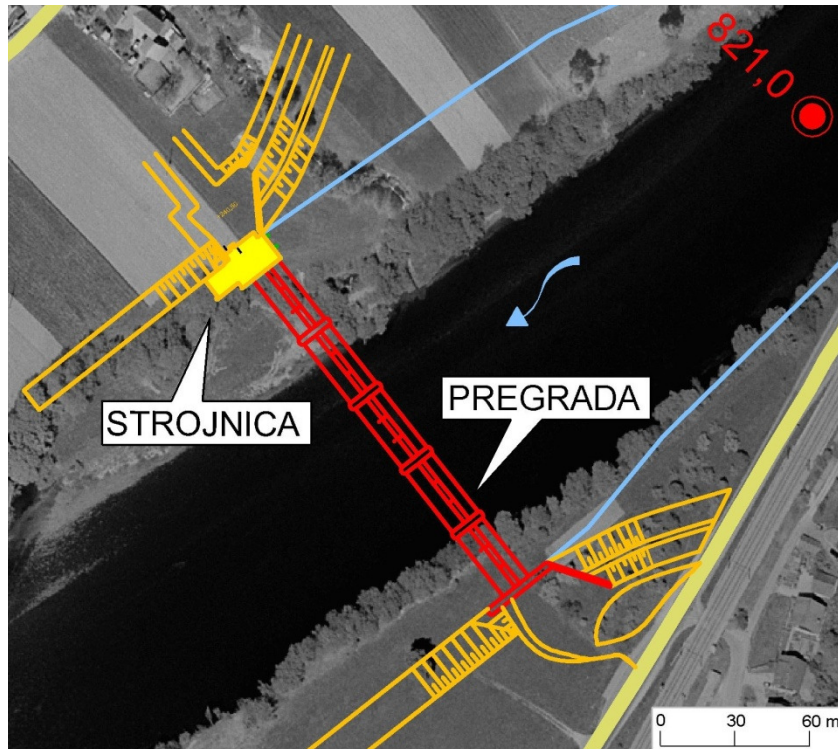
Diplomsko delo je zasnovano kot odgovor na zahteve in težave pri obravnavanem odseku. Naredili smo pregled do sedaj izvedenih zasnov na omenjenem delu reke Save in ugotovili, da so predlagane rešitve optimalne z energetskega vidika, medtem ko okoljska in prostorska vprašanja niso izpostavljena. Zato smo se odločili, da naredimo novo zasnovo za obravnavani odsek, kjer je energetski del postavljen v ozadje, vendar kljub temu prisoten in pomemben del načrtovanih ureditev. Na podlagi analize dosedanjih ureditev smo se lotili optimizacije odseka z novimi ureditvami in iskali optimalno okoljsko, prostorsko in energetsko rešitev s katero bi uskladili različne ključne interese v prostoru. Hkrati pa zasledovali cilj po čim manjših vplivih na okolje oziroma izogibanje nekaterim vplivom, kjer je to mogoče.

Kriteriji načrtovanih ureditev so zastavljeni tako, da zagotovimo:

- vizualno podobo telesa reke Save
- čim manjše posege v prostor
- okoljsko sprejemljivost
- vrhunsko oblikovanje obvodnega prostora
- optimalno energetsko izrabo

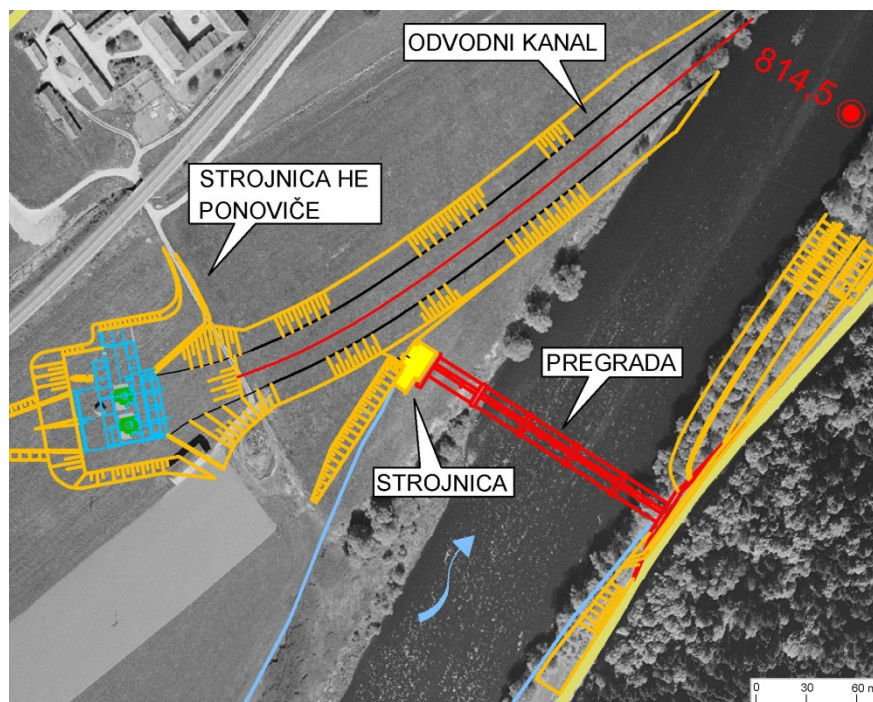
4.6 Pregled do sedaj izvedenih zasnov energetske izrabe Save na območju Litije

V okviru predinvesticijske tehnične dokumentacije za HE na srednji Savi je bila za območje Litije, podana rešitev, ki predvideva izgradnjo dveh pragov z nameščenim mehkim jezom, zaščitenim z jekleno pločevino za stabilizacijo struge in istočasno tudi izgled le te. Situacija obravnavanega odseka z načrtovanima pragovoma in ureditvami se nahaja v **Prilogi A 2**. Prag Litija I (Slika 20) se nahaja na rečni stacionaži 821 km, s koto zaježitve 238 m in s svojim izgledom oblikuje severni vstop v mesto Litija. Prag Litija II (Slika 21) se nahaja na rečni stacionaži 814.490 km, koto zaježitve 231 m in oblikuje vzhodni vstop v mesto. Jezovni zgradbi sta unificirani s 5 polji širine 30 m, ki so deljena v posamezne segmente, z možnostjo uravnavanja pretoka, z regulacijo tlaka v mehkem jezju. Pregradi bosta povzročili velike spremembe v rabi prostora in v prostorski sliki Litije, pri čemer je predvsem pomembna sama jezovna zgradba.



Slika 20: Prag Litija I (Študija FGG in Geateh, 2007)

Na desnem bregu je načrtovana strojnica mHE, kjer sta nameščeni 2 jaškasti turbini ter prostor za namestitvev potrebne regulacije za obratovanje jezua. Vsaka od turbin ima požiralnost $10 \text{ m}^3/\text{s}$ za izkoriščanje biološkega minimuma v $20 \text{ m}^3/\text{s}$.



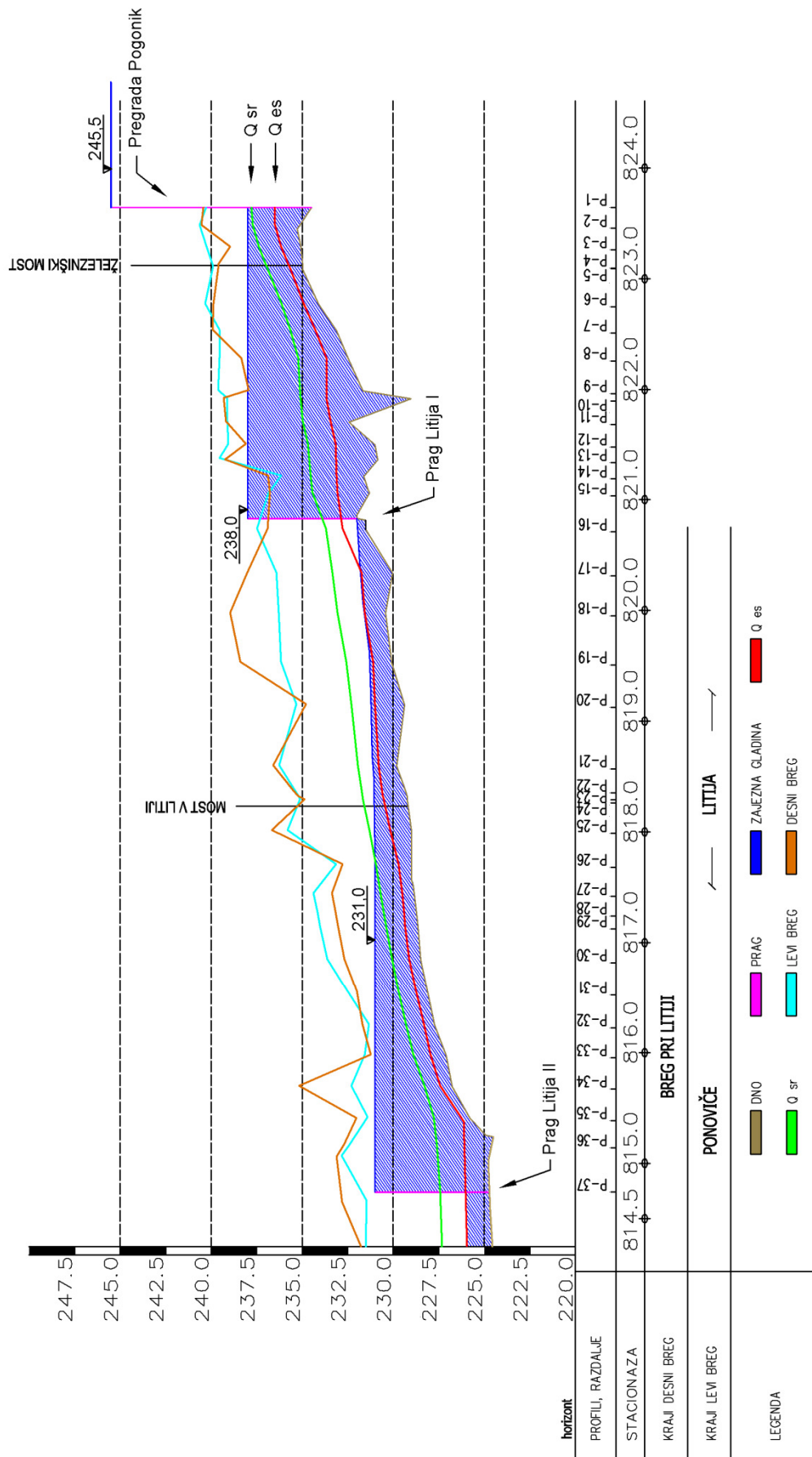
Slika 21: Prag Litija II (Študija FGG in Geateh, 2007)

4.7 Analiza do sedaj izvedenih zasnov energetske izrabe Save na območju Litije

Pri analizi obravnavane zasnove z mHE Litija I in mHE Litija II je potrebno izpostaviti, da je predlagana varianta **optimalna v energetskega smislu**, medtem ko sta okoljski in prostorski vidik zapostavljeni. Zato predlagana zasnova ne sledi kriterijem umeščanja pragu v prostor. Rešitev ni optimalna z okoljskega in prostorskega vidika, ker predlagani ukrepi ne sledijo cilju po čim manjših vplivih na okolje oziroma izogibanje nekaterim vplivom, kjer je to mogoče. Podana zasnova predstavlja možnost zagotavljanja primerne gladine reke Save na območju Litije z izgradnjo dveh pragov. V računskem hidravličnem modelu smo naredili izračun zajeznih gladin (Slika 23), ki nam pokaže nekatere pomanjkljivosti obravnavane zasnove. Prag Litija I povzroči dvig gladine v pregradnem profilu na koto 238 m, kar je več kot je s stališča okoljevarstva potrebno. Z načrtovanimi ukrepi želimo zgolj ohraniti vizualno podobo telesa reke Save, energetska izraba je drugotnega pomena. Z višanjem gladine se pojavi težava z gradnjo nasipov, stabilizacijo brežin in kmetijskimi zemljišči, ki jih je potrebno nadvišati (10 ha), saj dvig podtalnice lahko ogrozi nadaljnjo kmetijsko obdelavo. To za sabo potegne tudi dodatna zemeljska dela in podražitev investicije, zato je potrebno pri nadaljnji optimizaciji določiti optimalno koto zaježitve za ta prag. Težava z nadvišanji zemljišč je še bolj izrazita pri pragu Litija II (Slika 22), kjer so ogrožene površine bistveno večje (70 ha). Ta pregrada je bistvenega pomena, saj z njim zagotavljamo primerno gladino v rečnem koritu na območju mesta Litija. Vendar pa vzdolžni profil pokaže, da je gladina po načrtovanih ureditvah višja za 0,25 m do 0,5 m. Problem je zlasti gorvodno od cestnega mostu v Litiji, kjer se zajezna gladina zelo približa gladini pri ekološko sprejemljivem pretoku. Z načrtovano zasnovo torej nismo dosegli uravnotežene struge in bistvene spremembe glede na gladino vode pri Q_{es} .



Slika 22: Nadvišanje kmetijskih površin dolvodno od Litije (Študija FGG in Geateh, 2007)

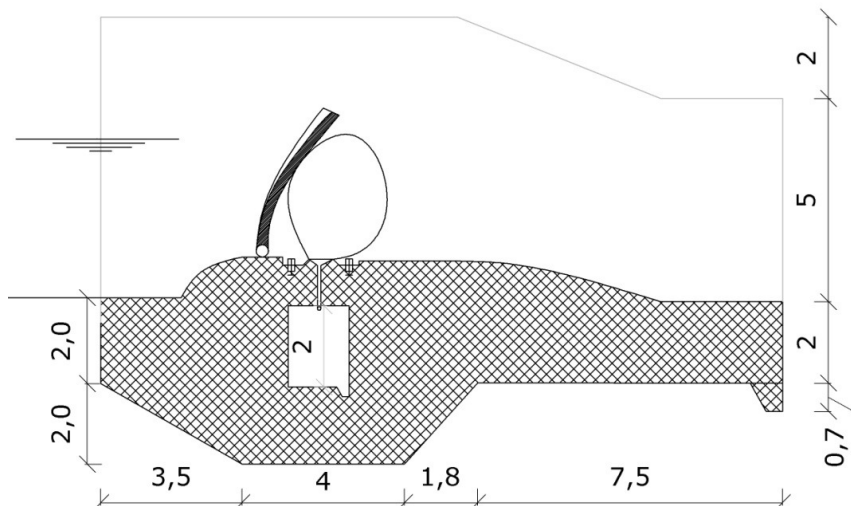


Slika 23: Vz dolžni profil obravnavanega odseka z dvema pragoma

Tudi sama prostorska zasnova pregrad je pomanjkljiva. Na pragu Litija I je strojnica načrtovana na desnem bregu reke Save. Glede na bližino ceste na levem bregu, bi bilo smiselno strojnico prestaviti, saj bi tako olajšali dostop do pragu. To je zlasti pomembno zaradi organizacije gradbene jame, kjer je enostaven dostop bistvenega pomena. Na obstoječi lokaciji se strojnica nahaja na konveksni strani krivine, kar lahko predstavlja težavo zaradi rinjenih plavin. Težave zaradi rinjenih plavin se pojavijo pri visokih vodah. V krivini se zaradi pretočne cirkulacije oblikujejo spiralni tokovi. Posledica tega je, da je tok ob dnu (trda faza) usmerjen h konveksnemu bregu, tok nad dnom proti vodni gladini (tekoča faza) pa je usmerjen h konkavnemu bregu. Posledično je konkavni breg podvržen eroziji, konveksni breg pa akumuliranju rinjenih plavin. Najprimernejše mesto za odvzem vode je torej na konkavni strani krivine. Pri izpadu obratovanja HE Ponoviče, bo po obstoječi strugi potoval poplavni val z pretokom $400 \text{ m}^3/\text{s}$, ki bo povzročil premeščanje plavin. Zato je pomembno na katerem mestu načrtujemo odvzem vode oziroma lokacijo strojnice. Prag Litija II je postavljen v neposredno bližino strojnice in odvodnega kanala HE Ponoviče. Tukaj je smiselno strojnico prestaviti na desni breg Save, kjer poteka regionalna cesta. Dostop do pragu bo tako bistveno izboljšan. Prag bo potrebno v nadaljnji optimizaciji pomakniti gorvodno zaradi načrtovanega iztoka iz derivacijske hidroelektrarne in pomanjkanja prostora na obstoječi lokaciji.

4.7.1 Pregrada mHE

Jez je zasnovan kot široki fiksni prag z gibljivim jezom. Gibljiv jez sestavlja gumeni napihljiv jez z zaklopko s katerim je regulirana gladina zajeze. Prostor za upravljanje manevrov z mehkim jezum se nahaja v strojnici. Za obe pregradi je predvidena izvedba po 5 polj širine 30 m, ki so deljena v posamezne segmente, ki se tudi posamezno odpirajo glede na regulacijo tlaka v blazini. Zaradi vzdrževanja in rednih inšpekcijskih pregledov je potreben kontrolni hodnik pod pregrado, ki omogoča dostop do posameznega segmenta. Posledica je višji armiran betonski prag (Slika 24), ki meri v višino preko 4 m.

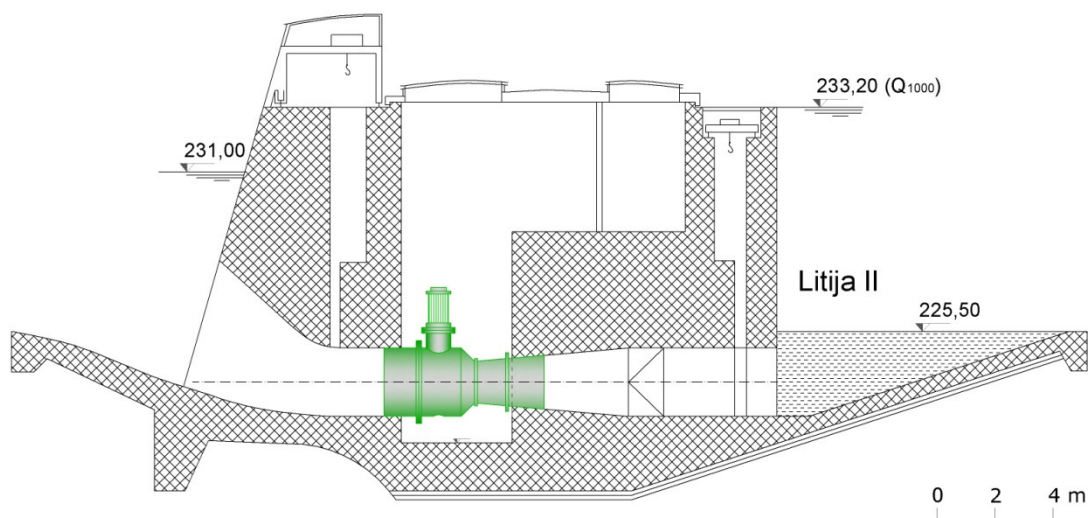


Slika 24: Prečni prerez prelivnega polja (Študija FGG in Geateh, 2007)

Izbira jeklene pločevine je pogojena z višino zajezbe, saj ta znaša 4 m. Pri izpadu HE Ponoviče iz obratovanja je potrebna hitra reakcija pri manevriranju z jezom na Litiji I in Litiji II, saj moramo omogočiti prevajanje obratovalnega vala skozi obstoječo strugo. Problem je zlasti zaradi višine zajezitve, ki ne dopušča dodatnega dviga gladine pri prehodu visokovodnega vala, saj bi se ta lahko razlil preko načrtovanih nasipov. V primeru nižje zajezne višine je mogoče razmišljati o uporabi gumenih jezov, ki kljub počasnejšemu manevriranju z jezom, omogočajo prevajanje obratovalnega vala. Jeklena pločevina zahteva dražje vzdrževanje in redne inšpekcijske preglede kritičnih potopljenih delov. Celotna pregrada se širi daleč preko obstoječega rečnega profila (Slika 20 in 21), z dimenzijami 175 m dolžine in preko 9000 m³ vgrajenega betona, pa predstavlja (pre)velik poseg v prostor. Na tem odseku je smiselno načrtovati manjše pragove, ki ne predstavljajo tako velikega posega v prostor ter zahtevajo manjše investicijske in obratovalne stroške.

4.7.2 Strojnica mHE

Strojnica je zasnovana s klasičnim turbinskim traktom, ki je sestavljen iz vtočnih rešetk, predturbinskih zapornic, turbine jašku, difuzorskih zapornic in sesalne cevi (Slika 25). Gre za dokaj velik objekt, dimenzij 37 x 15 x 12 m. V strojnici sta predvideni dve PIT oziroma jaškasti turbini, požiralnosti 10 m³/s. Turbina je lahko nameščena horizontalno ali pod naklon od 15° do 45°. Primerna je za padce od 2 - 8 m in pretoke do 45 m³/s, izhodne moč vse do 2,5 MW. Zaradi majhne hitrosti vrtenja potrebuje turbina prenosni mehanizem s katerim je povezana z hitreje se vrtečim generatorjem. Voda gre naravnost skozi turbino, zato so hidravlične izgube minimalne hkrati pa omogoča maksimalen pretok pri izbranih dimenzijah. Zasnova turbine omogoča enostaven dostop do generatorja in drugih delov turbine. Enostavna je tudi zamenjava gonilnika, saj ni potrebna odstranitev generatorja. Os turbine je potopljena za premer lopatic gonilnika pod spodnjo vodo.



Slika 25: Prečni prerez strojnice mHE (Študija FGG in Geateh, 2007)

4.8 Optimizacija s tremi pragovi

V prejšnjem poglavju smo opisali predlagano zasnovo z dvema pragovoma, katere primarni cilj je optimalna energetska izraba. Ker smo želeli preučiti še druge možnosti ureditve odseka, ki bolj upoštevajo okoljska in prostorska vprašanja, smo se lotili optimizacije predlagane zasnove. Cilj optimizacije je znižanje zajezne gladine na minimum, ki še ne spreminja razmer v Litiji ampak občutno zmanjša zasedenost kmetijskih zemljišč in vpliv na okolje. Zaradi znižane zajezne gladine smo optimizirali (racionalizirali) opremo za mHE in podali novo zasnovo pragov. Pri optimizaciji odseka smo se odločili za zasnovo s tremi pragovi s katerimi bomo zagotovili ustrezno gladino vzdolž celotnega odseka, kar je primarni namen načrtovanih ureditev. Situacija z načrtovanimi objekti in ureditvami je v **Prilogi A 3**.

Višina zajezitve je določena na podlagi tehničnih izhodišč:

- maksimalna omočenost osnovne struge
- varovanje zemljišč pri prevajanju visokih voda
- minimalna zasedenost kmetijskih zemljišč
- energetska izraba padca

4.8.1 Prag PODŠENTJUR

Pri izbiri lokacije pragu smo izhajali iz obstoječe zasnove z dvema pragovoma. Iz vzdolžnega profila obstoječega stanja je razvidno, da znaša padec na obravnavanem odseku okoli 10 m. Ker načrtujemo izgradnjo treh pragov, smo odsek razdelili na tri približno enake dele in v okviru teh lokacij iskali najbolj primeren prečni profil za umestitev pregrade.

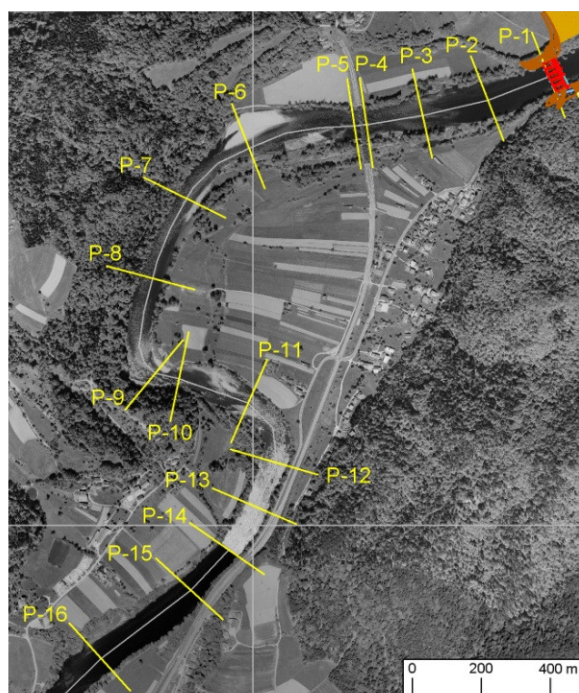


Slika 26: Ogljed terena lokacije pragu Podšentjur

Z optimalno izbiro lokacije pragov vplivamo na poplavno varnost ter potrebne hidrotehnične ureditve gorvodno in dolvodno od pregrade. Stroški gradnje nasipov, poglobljanja struge, zavarovanja brežin,

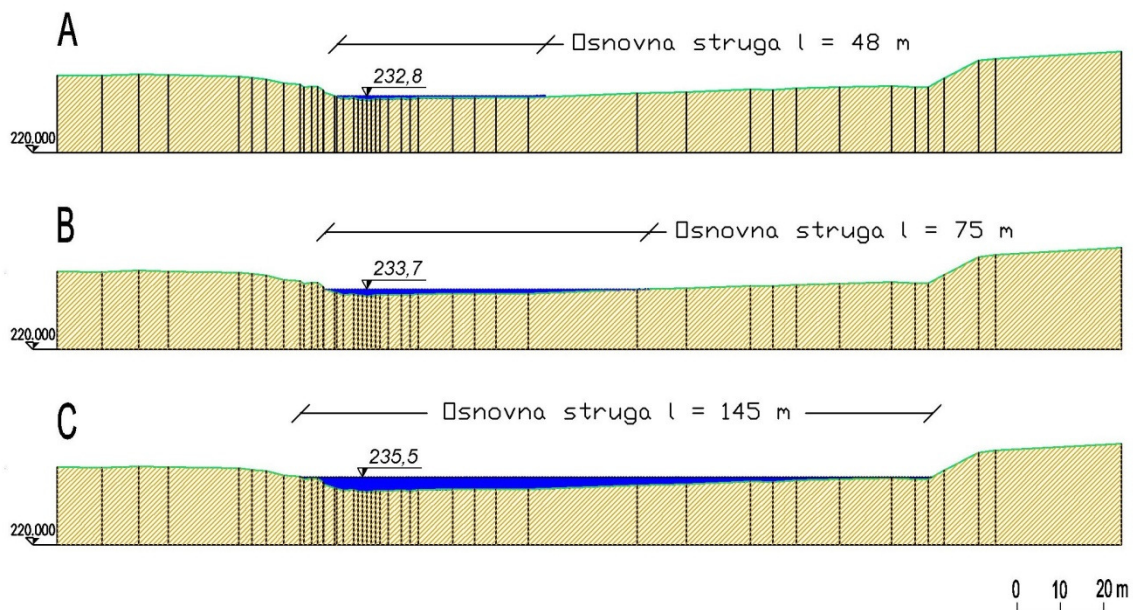
nadvišanja zemljišč in ureditev izlivov lokalnih vodotokov se lahko bistveno spreminjajo med različnimi lokacijami pragu.

Po ogledu terena (Slika 26) in glede na vzdolžni profil obravnavanega odseka smo ocenili, da je prečni profil z oznako P-16 zelo primeren za umestitev pragu, saj bodo na vplivnem območju potrebna minimalna hidrotehnična dela, pregradni profil se ne širi preko naravnega prečnega profila, omogoča hidravlično ugoden natok in enostaven dostop do pregrade (Slika 27). Zaradi bližine naselja Podšentjur smo ta prag poimenovali po omenjenem naselju. Glede na podatke iz vzdolžnega profila in tehničnih izhodišč za določanje višine zaježitve smo določili koto zaježitve na 235,5 m. Z izbrano koto dosežemo dvig zajezne gladine nad gladino Q_{sr} vzdolž 2/3 akumulacije, hkrati pa niso potrebni ukrepi za nadvišanje kmetijskih površin, saj je kota zaježitve več kot 2,5 m nižja od kmetijskih zemljišč. Najnižja točka profila P-16 leži na koti 232,04 m kar to pomeni da višina načrtovanega pragu znaša 3,5 m.



Slika 27: Obravnavan odsek pragu Podšentjur z označenimi prečnimi profili

Slike 28 prikazuje prečni profil P-16 pri različnih pretokih. Struga reke je pri ekološko sprejemljivem pretoku skoraj suha (profil A) z največjo globino 0,76 m in širino osnovne struge 48 m. Razvidno je, da so potrebni ukrepi za dvig gladine in večjo omočenost prečnega prereza. Profil B prikazuje prečni profil P-16 pri srednjem letnem pretoku $Q_{sr} = 170 \text{ m}^3/\text{s}$ s širino osnovne struge 75 m. Profil C prikazuje isti prečni (pregradni) profil s koto zaježitve 235,5 m. Razvidna je veliko večja omočenost struge reke - 145 m, vendar pa gladina ostaja več kot 2,5 m nižje od kote kmetijskih zemljišč, zato nadvišanje površin ni potrebno. To je tudi pogoj, da smo določili koto zaježitve na 235,5 m. Iz vzdolžnega profila je razvidno, da je zajezna gladina krepko nižje od levega in desnega brega, kar pomeni da ni potrebe po gradnji nasipov ali nadvišanju zemljišč.



Slika 28: Prečni profil P-16 pri različni pretokih in robnih pogojih

4.8.2 Prag LITIJA

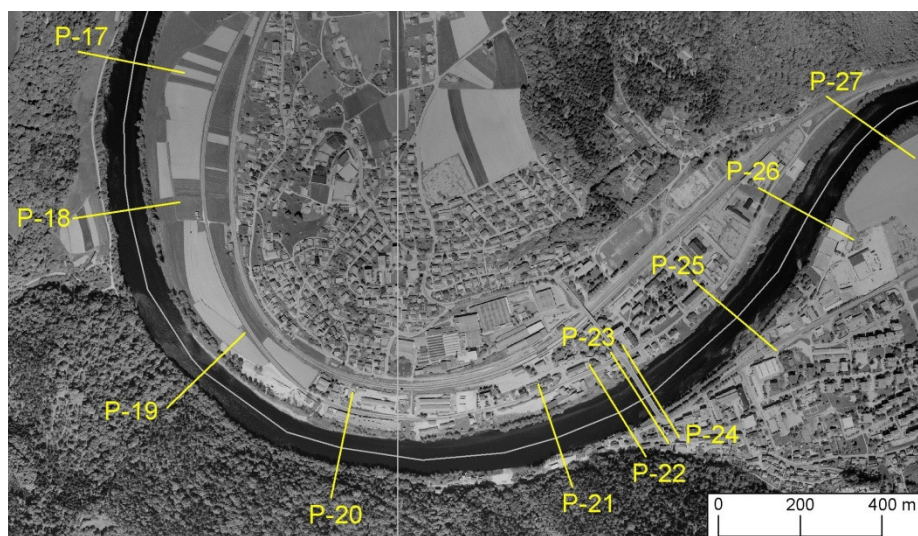
Prag Litija je zelo pomemben za obravnavan odsek, saj z njim zagotavljamo vizualno podobo telesa reke Save vzdolž samega mesta Litije. Pri izbiri lokacije pregrade smo uporabili vzdolžni profil odseka in dejansko prostorsko situacijo na terenu. Lokacijo pragu smo umestili dolvodno od centra mesta Litije, tako da je omočenost struge največja ravno vzdolž mesta. Mesto Litija potrebuje nove kvalitetne obvodne ureditve saj trenutne niso zadovoljive (Slika 29).



Slika 29: Struga reke Save v mestnem profilu

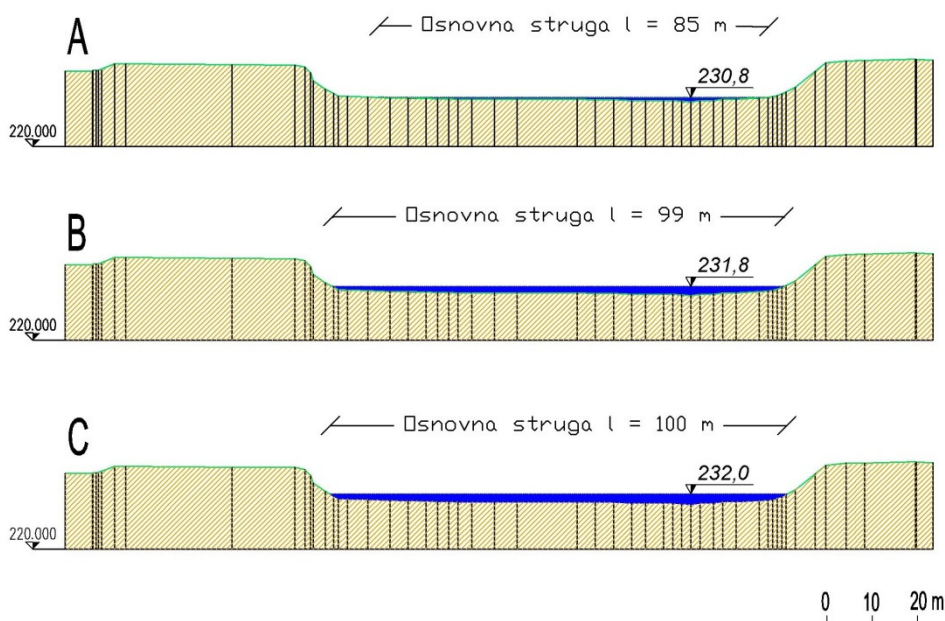
Glede na zbrane podatke smo se odločili za lokacijo na stacionaži 817,5 km, med profiloma P-26 in P-27 (Slika 30). Pregradni profil se ne širi preko naravnega prečnega profila, omogoča hidravlično ugoden natok, enostaven dostop do pregrade in dovolj prostora za umestitev pragu. Postopek

določanja višine zaježitve je enak kot pri gorvodnem pragu, na podlagi tehničnih izhodišč in vzdolžnega profila smo določili **koto zaježitve pri 232,0 m**.



Slika 30: Obravnavan odsek pragu Litija z označenimi prečnimi profili

Slika 31 prikazuje prečni profil P-21 pri različnih pretokih in robnih pogojih. Ta profil je zelo pomemben saj nam prikazuje razmere gorvodno od mostu v Litiji, torej v mestnem profilu. Na podlagi tega profila lahko primerjamo načrtovane ureditve (profil C) z obstoječim stanjem pri Q_{sr} (profil B) in stanjem brez ureditev pri Q_{es} (profil A) vzdolž mesta Litija. Vidimo, da je razlika v omočenosti struge med profiloma B in C zanemarljiva, kar je dobro, saj smo tako dokazali, da z načrtovanimi ureditvami zagotovimo sliko telesa reke Save vzdolž mestnega profila. Primerjava med profiloma A in C pa sploh pokaže prednosti načrtovane ureditve v primerjavi z varianto brez ureditev, saj je gladina vode v profilu A za več kot 1 m višja od gladine v profilu C.



Slika 31: Prečni profil P-21 pri različni pretokih in robnih pogojih

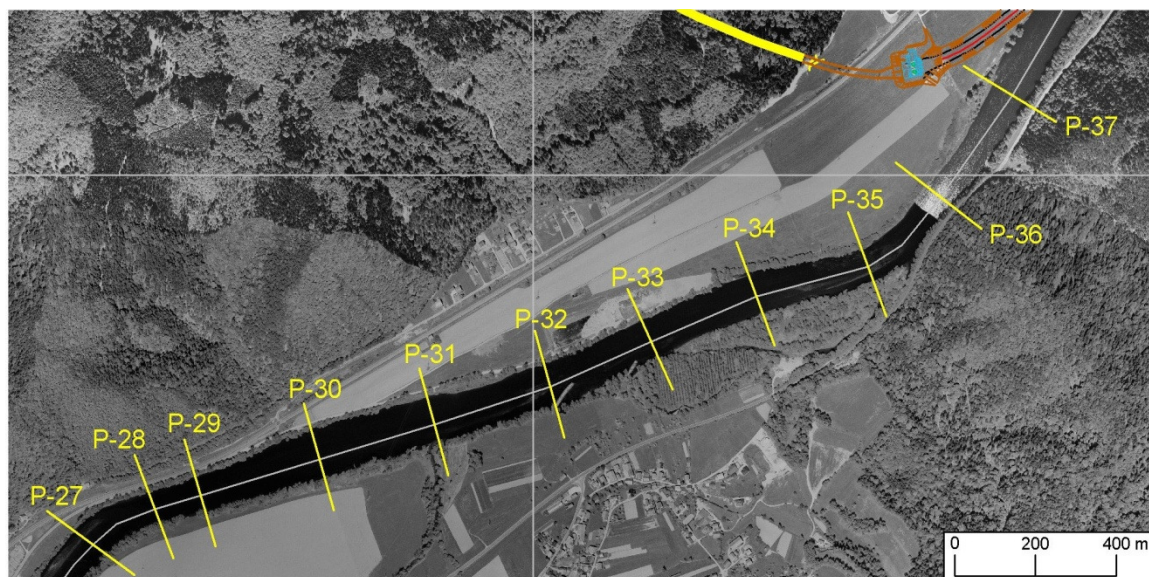
4.8.3 Prag PONOVIČE

Ker je tretji prag načrtovan blizu naselja Ponoviče smo ga poimenovali po omenjenem kraju. Načrtovan prag in hidrotehnične ureditve odseka so zelo pomembne, saj z njimi zagotavljamo protipoplavno zaščito naselja Ponoviče kot tudi strojnice HE Ponoviče. Pri dosedanjih poplavih se je izkazalo, da voda, ki se razliva po poljih in travnikih, vdira v naselje skozi železniške podvoze. V okviru načrtovanja protipoplavne varnosti smo v nadaljevanju zasnovali nasip na levem bregu reke Save, s katerim bomo to varnost tudi zagotovili.



Slika 32: Ogled terena lokacije pragu Ponoviče

Umestitev pragu je pogojena z lokacijo strojnice in odvodnega kanala HE Ponoviče, saj bo prag pomaknjena gorvodno od strojnice. Glede na lokacijo strojnice, vzdolžni profil in situacijo na terenu (Slika 32) smo izbrali P-36 kot pregradni profil (Slika 33).

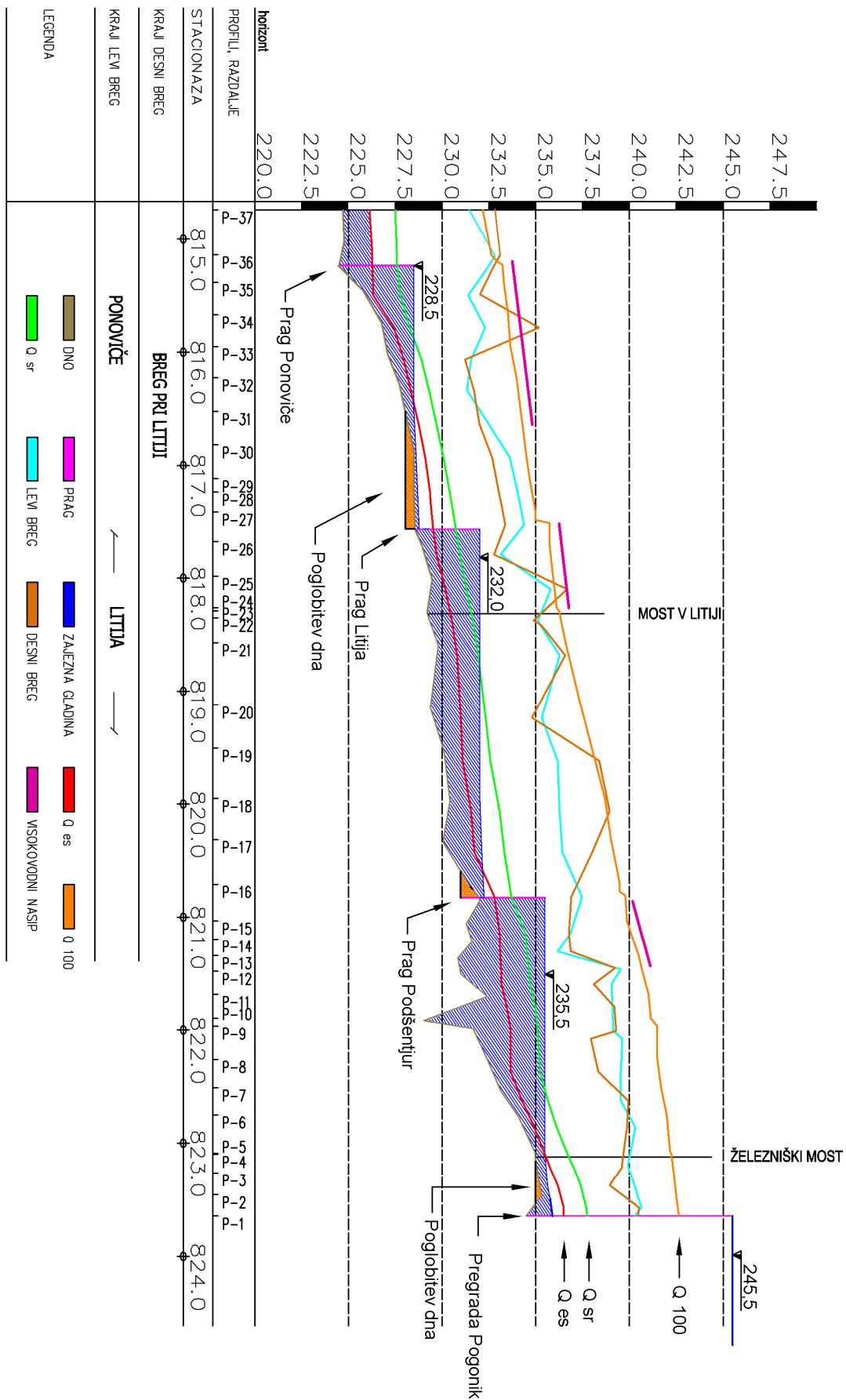


Slika 33: Obravnavan odsek pragu Ponoviče z označenimi prečnimi profili

Zajejna gladina pri tem pragu ni tako pomembna kot pri pragu Litija, saj struga poteka med polji in travniki in so kriteriji nižji kot v mestnem profilu. Zaradi omenjenega kriterija in neželenega dviga kmetijskih površin smo določili **koto zaježitve na 228,5 m**. Zaradi poplavne varnosti Litije in minimalne gladine pri Q_{es} , načrtujemo poglobitev dna struge na koto 228 m v dolžini 1 km dolvodno od pragu Litija. Pridobljen material se uporabi za izgradnjo visokovodnega nasipa na levem bregu. Zaradi ozkega prečnega profila bo potrebno strugo razširiti v levi breg, da omogočimo nemoteno prevajanje visokih voda. Nasip, ki se nahaja na levem bregu, se nadaljuje tudi dolvodno od pragu in se priključi na odvodni kanal HE Ponoviče. Tako preprečimo, da bi voda poplavila strojnico HE Ponoviče oziroma se prelila v nižje ležeči odvodni kanal.

4.9 Presoja predlagane rešitve

Glavni rezultat računskega hidravličnega modela so gladinske krivulje pri različnih pretokih in robnih pogojih (Slika 34). Te točke oziroma krivulje smo nato prenesli na vzdolžni profil in ga dopolnili z podatki o levem in desnem bregu, poziciji prečnih profilov, stacionaži in kraji, ki ležijo ob danem odseku. Vsi ti podatki tvorijo vzdolžni profil obravnavanega odseka, kjer je predstavljena zasnova s tremi pragovi. Na omenjenem profilu je mogoča primerjava gladinskih krivulj pri trenutnem stanju (referenčna gladina pri Q_{sr}), stanjem brez izgradnje pragov (referenčna gladina pri Q_{es}) in stanjem z izgradnjo treh pragov. Pri presojanju dobljenih rezultatov nas zanima ali smo izpolnili kriterije, ki smo si jih zadali na začetku optimizacije. Glede na obravnavani profil, je razvidno, da z izbranimi ureditvami zagotavljamo primerno vodno gladino vzdolž celotnega obravnavanega odseka, kar je bistven namen naše naloge. Zajejna gladina ohranja videz reke, ohranja gladino podtalnice in preprečuje zaraščanje struge reke Save. Še posebej smo bili pozorni pri obravnavi pragu Litija, s katerim smo zagotovili zadosten dvig gladine v mestnem profilu, ki omogoča nadaljnje kvalitetne ureditve obvodnega urbanega prostora. Dimenzije načrtovanih pragov so minimalne potrebne, glede na prvotno zasnovo zmanjšane in zahtevajo manjši poseg v prostor. Poplavna varnost se bo izboljšala, saj smo na nekaterih mestih poglobili strugo, prav tako pa načrtujemo nasipe s katerimi bomo varovali Litijo, Ponoviče in strojnico HE Ponoviče. Glede prevajanja visokih voda čez pragove, je pogoj da se vsa vodna količina prelije čez pregradni profil, tudi zato so potrebni visokovodni nasipi ob pregradi. Dvig zajejne gladine in posledično dvig podtalnice ne vplivata na zemljišča v tolikšni meri, da bi bili potrebni obsežni ukrepi za nadvišanje kmetijskih in ostalih površin. Skupno je potrebno nadvišati 5 ha zemljišč, ka je v primerjavi z prvotnim predlogom velik korak naprej, saj zelo zmanjšamo obseg nadvišanih površin in hkrati potrebno količino gradbenih del. Z umestitvijo dodatnega pragu (Pragu Litija) se vodna gladina v mestnem profilu dvigne na koto 232,0 m in tako ponuja možnost za ureditev brežin reke Save, ki so trenutno zanemarjene in neurejene, obrečni prostor pa popolnoma neizkoriščen. Z nadaljnjim načrtovanjem lahko čez prag Litija omogočimo premostitev, ki bo povezala levi in desni del mesta Litija.



Slika 34: Vzdolžni profil obravnavanega odseka s tremi pragovi

4.10 Nadvišanje zemljišč

V okviru ureditve ovinka na stacinaži 821,5 km bo potrebno razširiti strugo in nadvišati 2,5 ha kmetijskih zemljišč. Nadvišanje kmetijskih površin se izvede zaradi dviga podtalne vode in kapilarnega dviga, ki povzroči zmanjšanje kmetijskega potenciala in zamočvirjenje zemljišč. Ukrep se izvede na območjih, kjer je gladina podtalnice 1,5 m pod površjem in sicer kot deponija nasutega materiala iz struge. Posledice tovrstne sanacije pomenijo dolgotrajno zmanjšan potencial kmetijskih zemljišč. Še posebej je pomemben strokovni nadzor med izvajanjem ukrepov, da ne pride do dodatnega poslabšanja kvalitete kmetijskih zemljišč.

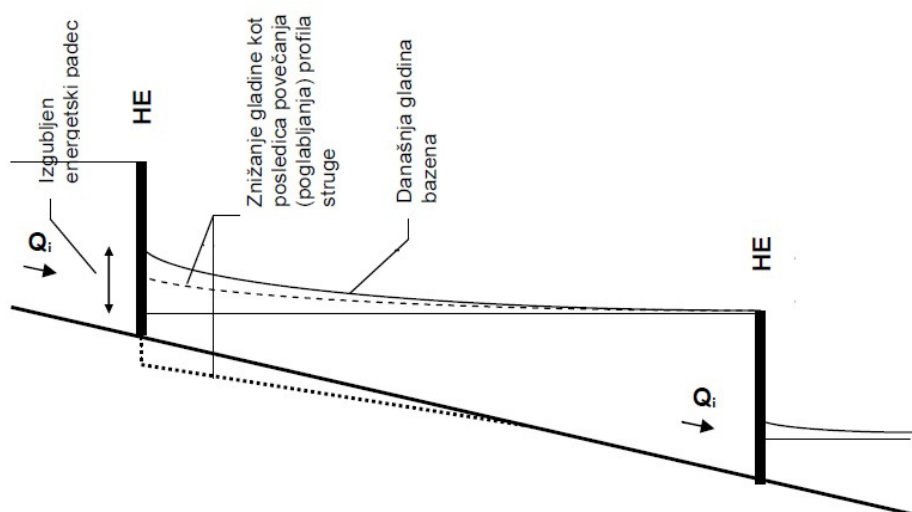


Slika 35: Nadvišanje kmetijskih površin na Pijavškem polju (<http://www.he-ss.si>)

Vsako nadvišanje terena se izvaja postopoma. Humusna plast se odgrne z manjše površine, na le-to površino se namesti deponiran material in nato prekrije humusno plastjo. Pri tem je potrebno paziti na zaporedje odgrinjanja in nasipanja humusnih plasti v skladu s prvotnim talnim profilom. Če pride do napake pri izvajanju, kar se lahko pokaže s formiranjem manj propustnega površinskega sloja mora investitor izvesti drenažni sistem. Predlagana globina odkopa je do matične podlage tal. Odgrinjanje poteka po plasteh, ki so odvisne od talnih horizontov. Najprej se odgrne travna ruša ter humusna plast do globine obdelave tal 20 cm. Naslednja plast, ki se nahaja pod humusno plastjo, se odgrne do pripadne globine in shrani na kupu, ločenem od kupa prve, humusne plasti. Tako poteka odstranjevanje talnih horizontov vse do matične podlage (Slika 35). Na odkriti del tal se na matično podlago nasuje deponija. Vrstni red nalaganja deponije poteka tako, da na dno pride grob material – večji skalnati kosi v ustrezni debelini, ki bo omogočila 1,5 m nadvišanja nad predvideno koto podtalnice. Deponiran material je ob nasipanju/nalaganju potrebno čim bolj zdrobiti in komprimirati. Na skalnat material se nasipa plast prodra. Prodna plast naj bo nasipana v višini 50 cm (minimalno) nad nivojem podtalne vode. Prod naj bo nasut tako, da bo imela plast prodra rahel padeč v smeri proti reki, kar bo omogočilo odtekanje vode ob morebitni formaciji nepropustne plasti. Na prodno plast se nasipajo odrinjeni talni horizonti upoštevajoč prej obstoječi talni profil. Najprej se nasuje najgloblji horizont, nato po vrsti vse do vrhnje humusne plasti, upoštevajoč prejšnji profil tal (Študija FGG in Geateh, 2007).

4.11 Poglobitev struge

V okviru obravnavanega odseka smo na določenih mestih predvideli ukrep poglobljanja struge reke Save z namenom znižanje zajezne gladine. Običajno se pri energetskih projektih odločimo za ukrep poglobitve struge s ciljem po optimalnem izkoristku hidravličnega padca na danem odseku. Poglobitev struge pod zgornjo pregrado HE povzroči znižanje gladine na tem mestu, vendar s tem ukrepom ne vplivamo na hidravlični padec elektrarne dolvodno. Povzročimo pa večji hidravlični padec na zgornji pregradi HE in s tem večjo moč elektrarne (Slika 36). Tudi v našem primeru bomo zaradi poglobitve struge dosegli večji padec na pragu Podšentjur in pragu Litija. Vendar pa struge ne poglobljamo zaradi optimizacije energetskega dela, ampak zaradi zagotovitve ustreznega prečnega profila pri pretoku Q_{es} . S poglobitvijo in razširitvijo dosežemo večjo omočenost struge, kot tudi večjo globino vode na poglobljenem odseku. Načrtovane poglobitve struge so prikazane na vzdolžnem profilu (Slika 34) in v situativnem prikazu v prilogi A 3.



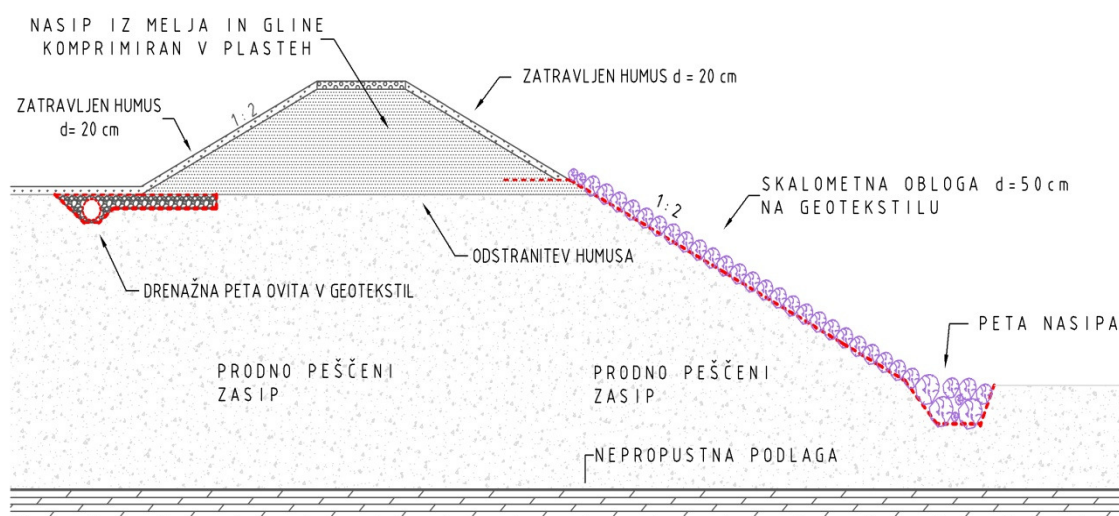
Slika 36: Povečanje hidravličnega padca s poglobitvijo struge pod pregrado
(Rajh, Dobnikar, Milič, 2002)

Poglobljanje struge se prične s pripravo dostopnih poti, ki se izvedejo z izvedbo začasnih nasipov s krono nad vodno gladino. Nasipi se izvedejo z uporabo materiala izkopanega iz struge in se izvajajo s hidravličnim bagrom, ki je opremljen z globinsko žlico. Razporeditev poti je odvisna od lokacije deponije in razpoložljive mehanizacije. Podvodni izkopi se izvedejo z globinsko žlico v premeru dosega roke bagra, ki se po izvedbi transportne poti pomika vzvratno. Z žlico pogloblja dno struge in vrši izkop izvedenega nasipa, ki služi kot stojišče bagra kakor tudi transportna pot. Izkopani material se naloži na demperje, ki ga odvažajo na deponijo. Na mestih, kjer se nahaja skalnata podlaga je predvideno razstreljevanje hribine s predhodno izvedbo vrtin do predvidene globine, vstavljanjem eksploziva in razstrelitvijo (Rajh, Dobnikar, Milič, 2002).

4.12 Visokovodni nasipi

Na obravnavanem odseku pri Litiji ne načrtujemo gradnje energetskih nasipov, ker so zajezne gladine v vseh treh akumulacijah znatno nižje od obstoječega roba osnovne struge in ne pride do preplavitve okoliškega terena.

Načrtujemo pa gradnjo visokovodnih nasipov z namenom varovanja površin pred stoletnimi poplavnimi vodami $Q_{100} = 2400 \text{ m}^3/\text{s}$. Odločili smo se za homogen zemeljski nasip, ki se pogosto uporablja za protipoplavne nasipe. Pri homogenem nasipu govorimo o nasipu, ki je zgrajen iz ene vrste materiala. Izbira materiala nasipa je pogojena z masno bilanco projekta, geometrije nasipa, bližine drugih virov surovin in od lastnosti temeljnih tal. V okviru izravnave mas, bomo uporabili material, ki ga bomo pridobili pri poglobljanja struge. Nasip bo torej iz melja in gline, komprimiran v plasteh, temeljen na prodno-peščena tla. Brežine nasipa so v naklonu 1:2. Na obeh straneh nasipa je predviden zatravljen humus s katerim dosežemo lepši krajinski izgled in večjo okoljsko sprejemljivost. Na zračni strani nasipa se nahaja drenažna peta ovita v geotekstil, s katero odvodnjavamo izcedne vode izpod nasipa ter zmanjšujemo vodne pritiske in s tem povečamo stabilnost nasipa. Na vodni strani je načrtovana brežina s skalometno oblogo, dimenzije 50 cm, položena na geotekstil. Obloga se konča s peto nasipa, ki je vkopana v raščeni teren in nasuta iz večjih skal. Višina zavarovanja je pogojena s pretokom $Q = 400 \text{ m}^3/\text{s}$, ki se pojavi pri nenadnem izpadu obratovanja HE Ponoviče. Dimenzioniranje skalometne obloge je prikazano v Prilogi C. Z geotekstilno oblogo preprečujemo notranjo erozijo tal in izpiranje drobnih delcev zemljine iz nasipa. Večjim delcem je tako preprečeno izpiranje, medtem ko je manjšim delcem omogočeno prehajanje obloge. V primeru zablatenja geotekstilne obloge lahko pride do pojava zastojnega pornega tlaka in zmanjšanja varnosti brežin.



Slika 37: Prečni prerez tipičnega zemeljskega nasipa na obravnavanem odseku

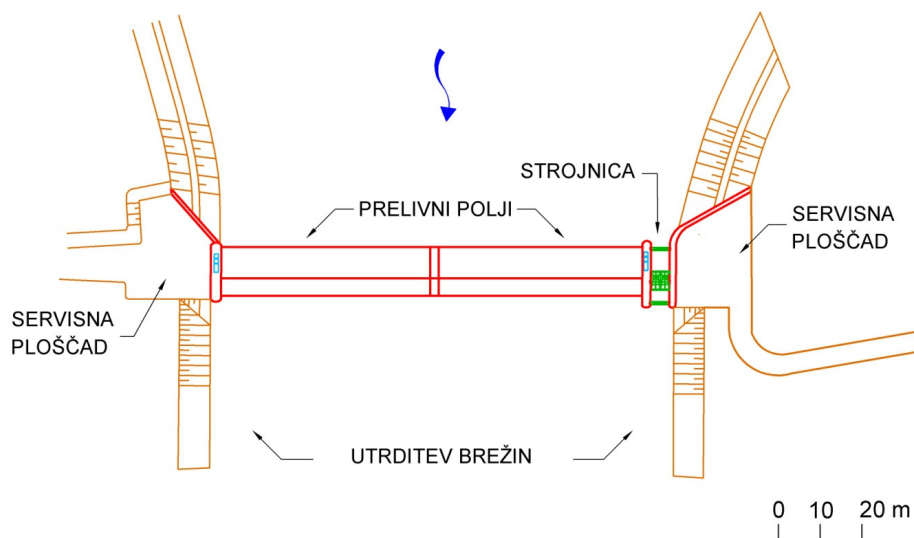
5 PREGRADNI OBJEKT

5.1 Opis pregrade

Pri zasnovi in načrtovanju pregradnih objektov smo izbrali rešitve, ki so v našem okolju splošno uveljavljene in poznane. Vse tri pregrade so zasnovane kot prag z gumeno membrano, ki omogoča regulacijo zajezne gladine. Za gumeni jez smo se odločili zaradi manjših zajeznih višin (2,5 m), odzivnosti na spremembe v pretoku in številnih prednosti v primerjavi z klasičnimi zapornicami. Strojnica je zasnovana zelo enostavno - kot kanal, v katerega se vstavi prefabricirani turbinski modul. To nam omogočajo turbine tipa Straflomatrix, ki v Sloveniji še niso vgrajene.

Jezovne zgradbe so unificirane, kar nam omogoča ugodnejše pogoje pri dobavi opreme. Prelivni del pregrade je sestavljen iz dveh prelivnih polj dolžine 45 m, ki sta opremljeni z gumeno membrano (Slika 38). Vsako prelivno polje ima v obrežnem stebru manipulacijski jašek, ki omogoča regulacijo zajezne višine gorvodno od pregrade. Pri prevajanju visokih voda, se gumena membrana samodejno izprazni in tako omogoči nemoteno prevajanje visokih voda, kot tudi plavljenje plavin in plavja. Nasip pred pregrado je pomemben zlasti pri visokih vodah, ko usmeri vso vodo skozi pregradni profil, da ne prihaja do preliivanja ob pregradi. Zaradi erozije so pod pregrado načrtovane utrditve s skalometno oblogo, da ne pride do poškodbe brežin. Pogonski del pregrade predstavlja strojnica z dvema Straflomatrix turbinama. Strojnica je zasnovana v obliki kanala in nima hidromehanskih zapornic za manevriranje pretoka skozi kanal. Nad strojnico se nahaja portalni žerjav, ki v primeru visokih voda omogoča dvig turbin iz kanala. Sproščeni kanal tako služi kot talni izpust za prevajanje plavin.

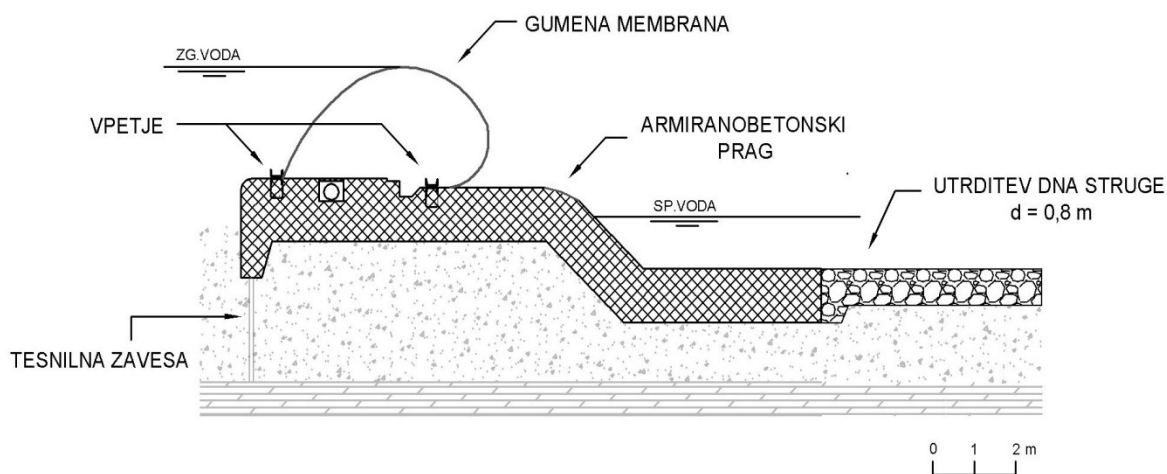
Načrti pragov so prikazani v **Prilogi B 1, 2, 3**.



Slika 38: Tloris pregradnega objekta z opisi

5.1.1 Prelivno polje

Prelivno polje je načrtovano kot široki prag z gumeno membrano. Prag je zasnovan kot armiranobetonska plošča na elastični podlagi, dolžine 45 m, širine 14 m, ki je ob robovih strižno vpeta v steber in dilatirana. Gorvodno je plošča razširjena z "zobom", ki preprečuje spodjedanje pregrade (Slika 39). Pod zobom je izvedena tesnilna zavesa, ki preprečuje precejanje vode pod pregrado. Posledica precejanja je izguba vode in nevarnost spodjedanja temeljnih tal. Tesnilna zavesa se izvede z *jet grouting* postopkom, tako da se tesnilno stabilizacijski JG koli izvedejo v ravni liniji na medosni razdalji, ki je določena predhodno na poskusnem polju. Koli ustvarijo nepropustno zaveso, ki onemogoči precejanje vode pod pregrado. Pod pragom je z namenom stabilizacije rečnega dna izvedena utrditev dna struge, z večjimi kamni premera $d = 0,8$ m. S tem preprečimo, da bi vodna erozija izdolbla tolmun in ogrozila stabilnost pregrade.

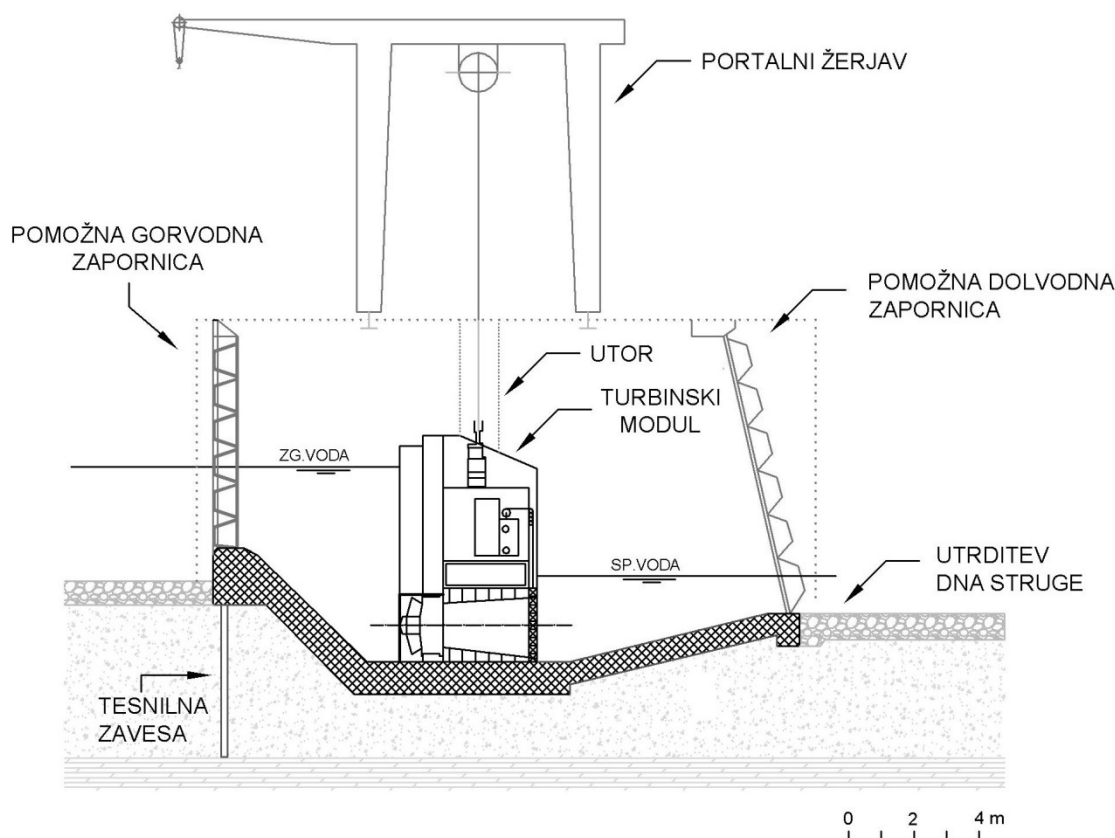


Slika 39: Prečni prerez tipičnega prelivnega polja z opisimi deli

5.1.2 Strojnica

Pri zasnovi strojnice in izbiri turbin smo zasledovali cilj, da želimo enostaven objekt, ki ne bo zahteven za upravljanje in vzdrževanje tako pri normalnem obratovanju kot pri prevajanju visokih voda. Hkrati pa enostavni objekti zahtevajo manj gradbenih del in so investicijsko ugodnejši. Odločili smo se za inovativno strojnico v obliki kanala, v katerega se bo vstavilo turbine v prefabriciranem jeklenem modulu (turbinski modul). Na stenah kanala se izvedejo utori, ki služijo za stabilizacijo turbinskega modula po vstavitvi v kanal. Poleg tega bo kanal prevzel funkcijo talnega izpusta za rinjene plavine pri prevajanju visokih voda. Takrat se bo s portalnim žerjavom odstranilo prefabricirani modul, tako da bo omogočen neoviran prehod vode in rinjenih plavin (Slika 40). To nam omogočajo turbine Straflomatrix, ki jih je razvilo podjetje Andritz in so posebej prilagojene na manjše pretoke in nizke padce. Turbine tega tipa še niso vgrajene na območju Slovenije, v svetu pa že deluje nekaj tovrstnih naprav. Prednost takšne manipulacije z turbinami se pokaže tudi v času

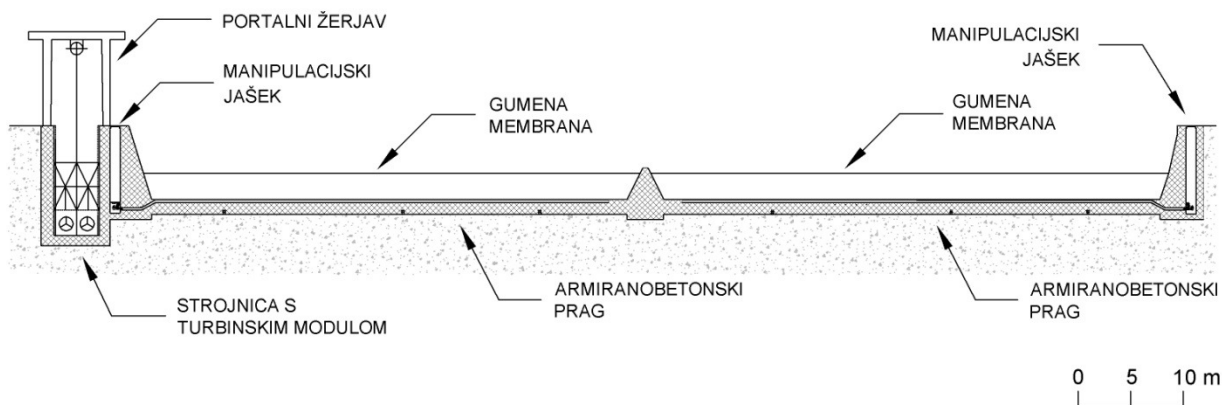
remontov oziroma popravil, saj lahko celoten modul dvignemo iz vode in tako omogočimo modifikacije opreme na suhem. Predvideva se tudi možnost namestitve pomožnih zapornic, s katerimi lahko zapremo kanal in opravimo morebitna sanacijska dela. Zapornice so unificirane in se jih po potrebi seli med objekti.



Slika 40: Prečni prerez tipične strojnice z opisi

5.1.3 Vzdolžni prerez pregrade

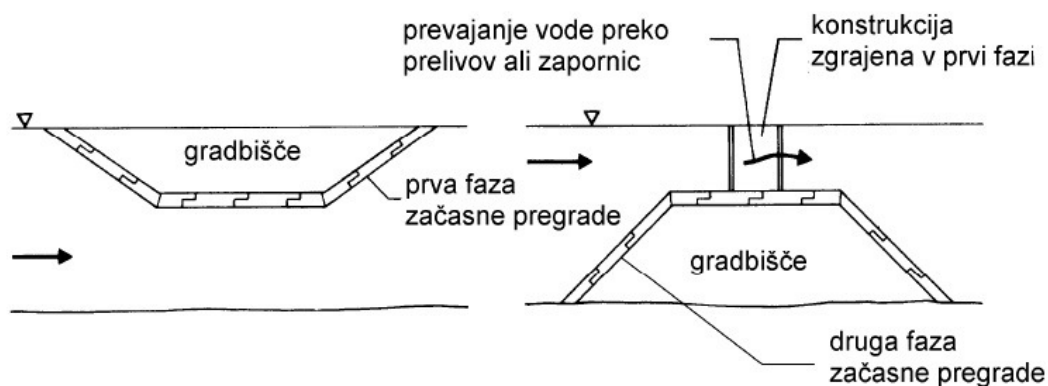
Oblika stebrov je pogojena z izbiro gumene membrane, saj pritrditev na robovih zahteva naklon 70 stopinj (Slika 41).



Slika 41: Vzdolžni prerez pregrade z opisi

5.2 Organizacija gradbišča

Gradnja pregrade bo potekala v dveh fazah z delnim zapiranjem vodotoka. Z začasno pregrado bomo najprej zaprli del vodotoka in v osušenem delu zgradili prelivno polje in robni ter vmesni steber (Slika 42). Začasna pregrada se izvede z narivanjem proda in gruščja. Nato bomo odstranili začasno pregrado in preusmerili pretok skozi že zgrajeno prelivno polje. Nato zapremo drugo stran reke in zgradimo še drugo prelivno polje in strojnico oziroma kanal. Gradnja visoke začasne pregrade ni ekonomsko smiselna, saj gre za relativno enostaven objekt s kratko dobo izgradnje. Vsi pragovi imajo ugoden dostop do regionalne cestne povezave, kar omogoča boljšo organizacijo gradbišča. V sklopu pripravljanih del oziroma ureditve cestne infrastrukture v območju pregradnega profila bo potrebna izgradnja priključnih cest. Zaradi bližine cestne infrastrukture so ti priključki krajše dolžine.



Slika 42: Shema osuševanja gradbišča z delnim zapiranjem vodotoka (Steinman in Banovec, 2008)

5.3 Gumijast jez

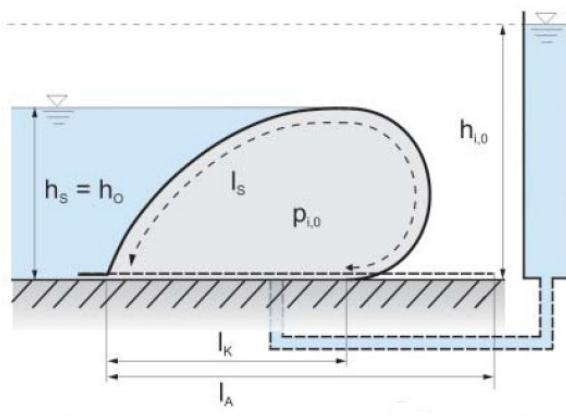
Gumijasti jezovi so moderen tip pomičnih in popolnoma avtomatskih načinov za uravnavanje vodne gladine. Zaradi enostavnosti izgradnje in obratovanja so primerni za manjše pregrade, tako za novogradnje kot za sanacijo obstoječih objektov (Savatech, 2012).

Prednosti:

- Nizki stroški vgradnje in obratovanja
- Pri povišani vodni gladini se jez samodejno spusti in omogoči prehod visokih vod in tako prepreči poškodbe in morebitno poplavljanje strojnice hidro elektrarne
- Zanesljivo obratovanje
- Možnost avtomatiziranega delovanja brez električnega napajanja
- Enostavna montaža in zamenjava poškodovanega jezu
- Zaradi fleksibilnosti zdržijo tudi ob zelo visokih vodah
- Dolga življenjska doba (20 let in več)

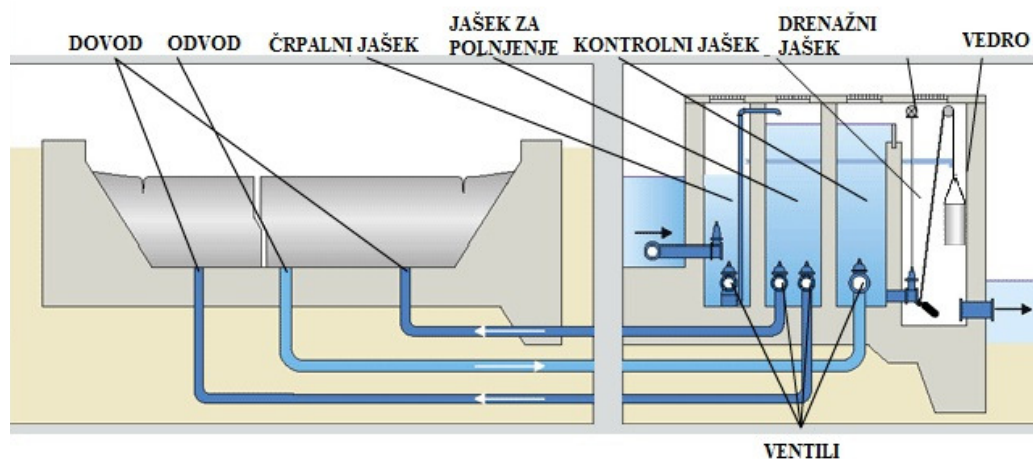
Gumijast jez sestavljajo trije osnovni deli:

- betonski prag oziroma podstavek
- gumena membrana
- jašek za krmiljenje jez



Slika 43: Zasnova gumenega jez (Gebhardt, 2007)

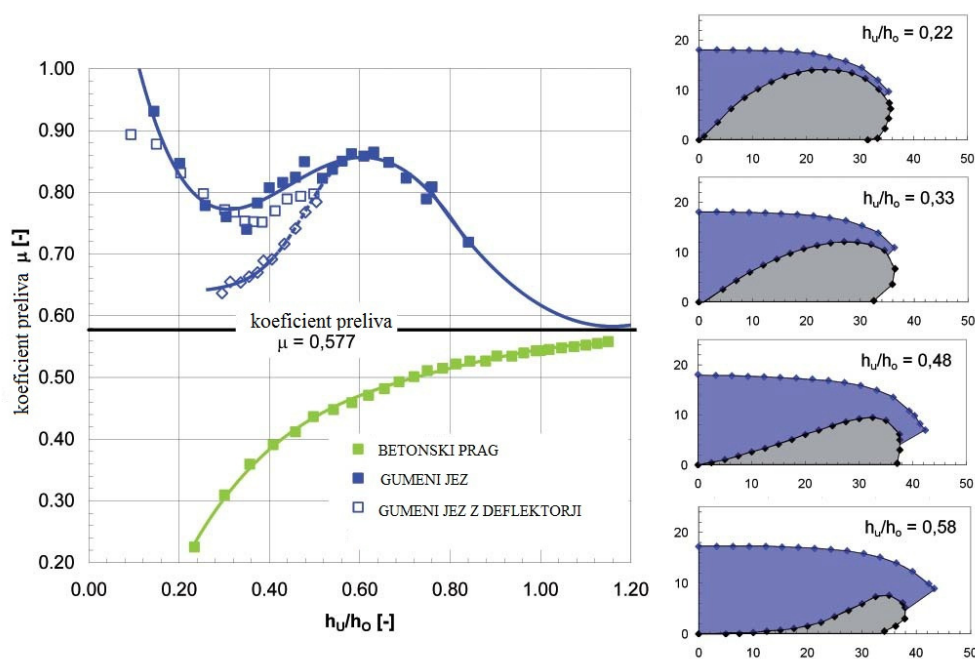
Višino vode v gumeni membrani nadzorujemo s pomočjo hidrostaticnega pritiska. Gladina vode v kontrolnem jašku (normalno obratovanje) je 30 do 40 cm višja od gladine vode v jez (Slika 43). Razlika v tlaku povzroči hidrostaticni pritisk s katerim lahko uravnavamo višino gumene membrane. Z višanjem gladine reke se poveča pritisk na membrano in voda se iz manipulacijskega jaška prelije v drenajni jašek. Gumena membrano tako izgubi prvotno obliko in se začne prilagajati vodnemu toku. Z višanjem gladine vode se membrana popolnoma izprazni in privzame obliko betonskega pragu. Obraten postopek poteka pri upadanju gladine, ko se tlak na membrano zmanjšuje in je vodna gladina v jašku za polnjenje jez višja od gladine vode v rečnem koritu. Sistem ima vgrajen tudi varnostni ventil, ki omogoča hitro izpraznitev jez (Slika 44). V primeru, da gladina reke narašča, jez pa se ne prične prazniti, se voda na določeni višini začne prelivati skozi varnostni preliv in napolni vedro, ki s svojo težo začne odpirati varnostni ventil, ter tako omogoči praznjenje jez.



Slika 44: Shema manipulacijskega jaška (prirejeno po <http://www.hydroconstruct.at>)

Ker so jezovi na splošno sestavljeni iz trdnega betonskega praga in ene ali več premičnih zapornic, se zaradi različnih geometrij pokažejo različni koeficienti preliva za zapornico in za prag jez. Dokler gumeni jez ni popolnoma spuščen, se koeficient preliva določa z geometrijo zapore v njenih vmesnih položajih: gornji nivo vode in s tem vsota $h_o = h_s + h_u$ iz višine zapore ter višine preliva h_u ostane konstantna. Geometrija trdnega telesa jez je v večini primerov enaka geometriji jez s široko krono, pri katerem hrbtni del jez v popolnoma spuščeni stanju oblikuje odlagalno površino za spuščeno gumeno membrano. Dolžina podstavka jez (približno 2 do 2,5-kratna višina jez) zadošča, da lahko nastane vzporedni tok s hidrostatično razporeditvijo tlaka. Koeficient preliva za jez s široko krono znaša $\mu = 0,577$.

Na Sliki 45 je prikazan koeficient preliva v odvisnosti od brezdimenzijskega povečanega toka za vodno poljnjeni gumeni jez. Pri tem opazimo, da je koeficient preliva največji pri majhnih višinah povečanega toka. Tok vode, ki se preliva čez jez, ne preneha, temveč »drži« skoraj do podnožja jez na površini. Z rastočo hitrostjo vodnega toka se na spodnji vodi zmanjšuje hitrost toka, pri čemer je točka padanja toka nestabilna in se v telesu jez zaradi nihanja tlaka sproži nihanje jez. Pri $h_u/h_o = 0,30$ doseže koeficient preliva pri $\mu = 0,76$ minimum. Nadtlak je pri tej višini vodnega toka daleč najbolj znižan in membrana na zgornji vodi dobi z naraščajočo višino toka obliko črke S. Telo jez, katerega oblika ni več dominantno določena z nadtlakom znotraj gumenega jez, lahko reagira na tlak toka in se oblikuje v obliko, ki je ustrežnejša za tok. Posledično ponovno naraste koeficient preliva. Z nadaljnjim zniževanjem višine jez se povečuje vpliv trdnega telesa jez in koeficient preliva se približa koeficientu preliva betonskega praga jez (Gebhardt, 2007).



Slika 45: Koeficient preliva za vodno poljnjeni gumeni jez (Gebhardt, 2007)

5.4 Izbor turbine

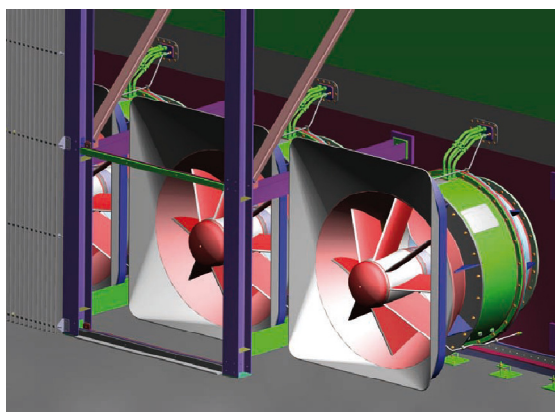
Idejo za zasnovo strojnice v obliki kanala in uporabo matrix turbin, smo dobili pri italijanskem projektu na reki Adiži, kjer so zapuščen ladijski kanal (Slika 46) uporabili za proizvodnjo električne energije. To so omogočile Straflomatrix turbine, ki se jih enostavno vstavi v obstoječi kanal.



Slika 46: Primer uporabe Straflomatrix turbin (Andritz, 2012)

5.4.1 Hydromatrix tehnologija

Hydromatrix je nov inovativen koncept izkoriščanja vodne energije, ki združuje prednosti preizkušene tehnologije in nizkih stroškov vgradnje tako v obstoječe pregrade, kot tudi v nove objekte. Projekte, ki niso ekonomsko vzdržni, lahko sedaj s hydromatrix tehnologijo optimiziramo tako, da postanejo profitabilni. Hydromatrix sistem tvorijo kompaktna razporeditev turbinsko generatorskih (TG) enot, ki je sestavljena iz vtočne rešetke, sesalne cevi, stikališča in kontrolnega elektronskega sistema. Temelji na modularnem sistemu, kjer je več manjših enakih TG enot nameščeno v okvir (modul), v matrični razporeditvi. Vsak modul je sestavljen iz identičnih TG enot, kjer je število enot optimizirano in vstavljeno v jekleno ohišje, ki je zasnovano glede na zahteve posameznega pregradnega objekta.

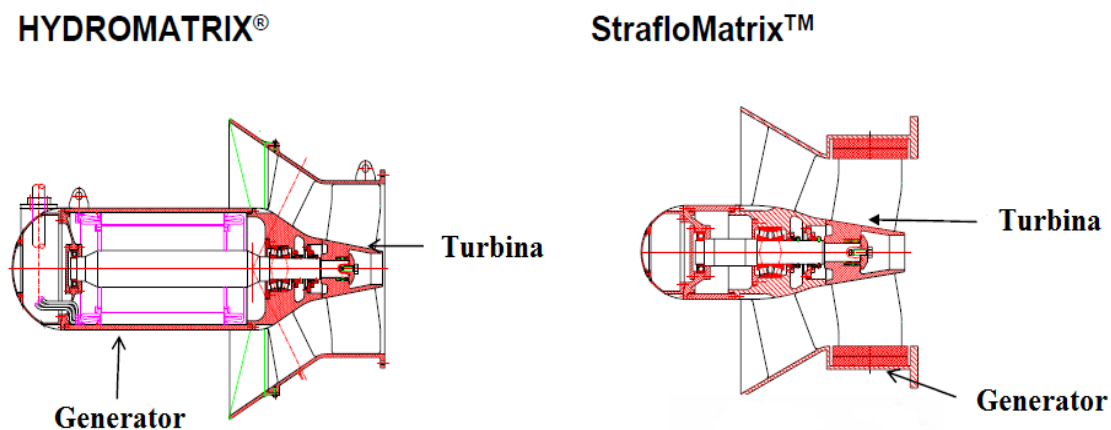


Slika 47: Straflomatrix enoti (Andritz, 2012)

Turbine potrebujejo plitvo temeljenje in lahko obratujejo z minimalno potopitvijo iztoka. Prihranek v primerjavi s klasičnimi turbinami je predvsem pri gradbenih delih, saj te turbine potrebujejo malo prostora in so prihranki veliki v primerjavi z gradnjo zahtevne strojnice. Vrhunska zasnova turbine in generatorja zagotavljata najvišji izkoristek pri proizvodnji električne energije, zaradi optimalne hidravlične in električne učinkovitosti. TG enote ne potrebujejo zahtevnejših vzdrževalnih del v daljših časovnih obdobjih, glede na število obratovalnih ur je potrebno menjati olje in očistiti filtre.

5.4.2 Straflomatrix turbine

Naslednji korak v razvoju Hydromatrix turbine je bila predstavitev koncepta StrafloMatrix, ki je oznaka za specialne turbine, ki so namenjene projektom z omejitvami glede prostora in teže modula. Posebnost teh turbin je integrirana zasnova gonilnika in rotorja generatorja, kjer je rotor pritrjen neposredno na obod turbinskih lopatic, kar posamezni enoti omogoča veliko kompaktnost. Zaradi takšne zasnove je TG enota 50 % krajša in 35 % lažja od Hydromatrix enote (Slika 48). Da bi zagotovili vodotesnost generatorja, sta rotor in stator popolnoma zapolnjena z izolacijskim tesnilom. Zaradi trenja imajo te turbine nekoliko slabši izkoristek, kar pa nadoknadijo z nizkimi stroški pri gradbenih delih. Ne-regulirana turbina in sinhroni generator omogočata enostaven priklop in obratovanje v obstoječem električnem omrežju. Območje delovanja je omejeno z višino 20 m in pretokom do $13 \text{ m}^3/\text{s}$ za posamezno turbino. Z združevanjem več enot v module pa lahko izkoristimo tudi večje pretoke (Andritz, 2012).



Slika 48: Primerjava hydromatrix turbin (prirejeno po Andritz, 2012)

5.4.3 Moč agregata

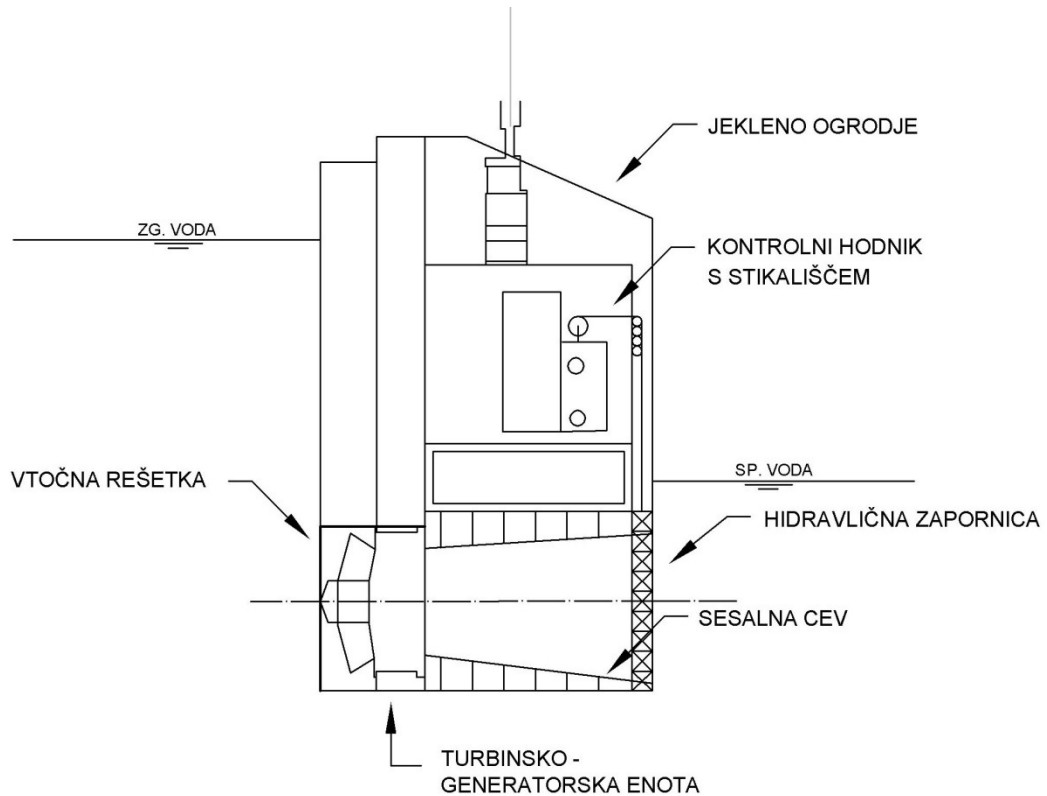
Za več tehničnih podatkov o agregatu sem se obrnil na podjetje Andritz Hydro GmbH, ki je razvilo obravnavane turbine. Po razgovoru s predstavnikom podjetja sem pridobil grafikon z območjem delovanja posamezne enote in izhodno močjo na sponkah generatorja (Priloga D). Na abscisni osi se nahaja bruto padec v metrih, na ordinatni osi pa pretok v kubičnih metrih na sekundo. Glede na karakteristike vsakega pragu smo, na podlagi grafikona, določili ustrezno moč posamičnega agregata. Hidravlične in električne izgube so že upoštevane v podatku o izhodni moči. Glede na to, da inštaliran pretok znaša $20 \text{ m}^3/\text{s}$ smo se na podlagi omenjene priloge odločili za uporabo dveh agregatov s premerom lopatic turbine 1320 mm.

Preglednica 5: Tehnične karakteristike načrtovanih pragov

Prag	Podšentjur	Litija	Ponoviče
H [m]	3,3	3,3	2,7
Q [m^3/s]	20	20	20
P _{agregata} [kW]	250	250	200
P _{enote} [kW]	500	500	400

5.4.4 Prefabricirani turbinski modul

Modul je predhodno sestavljen in zvarjen v delavnici, kar omogoča zelo hiter čas vgradnje na samem gradbišču. Potrebno je le avtodvigalo, ki vstavi modul v utore sredi kanala. Utori imajo funkcijo vpetja in stabilizacije celotnega modula pri obratovanju. Spodnji del jeklenega modula tvorita dve sesalni cevi, ki sta položeni v isto vrsto (Slika 49). Na vtoku je pritrjena StrafloMatrix enota, ki je bistven del obravnavanega modula. V zgornjem delu je kontrolni hodnik s stikalnimi omarami, kjer se nahaja hidravlični sistem za upravljanje z turbinskimi zapornicami ter inštalacije potrebne za generator. V kontrolni hodnik se lahko dostopa skozi jašek, ter se tako opravi inšpekcijske preglede in nujna vzdrževalna dela. Z zapornicami, ki so nameščene na iztoku iz sesalne cevi reguliramo pretok skozi turbino in s tem delovanje vsake enote posebej. Iztok mora biti nameščen najmanj 1,5 m pod vodne gladino. Zaščitna rešetka je privarjena na zgornjo stran modula, ki jo po potrebi očisti čistilni stroj. Nad kanalom se nahaja hidravlično dvigalo, ki lahko dvigne celoten modul ali pa vsako StrafloMatrix enoto posebej. V primeru visokih voda bo dežurna ekipa dvignila celoten modul in ga odložila na ploščad zraven pregrade. Kanal bo tako sproščen in služil za prevajanje visokih voda in rinjenih plavin.

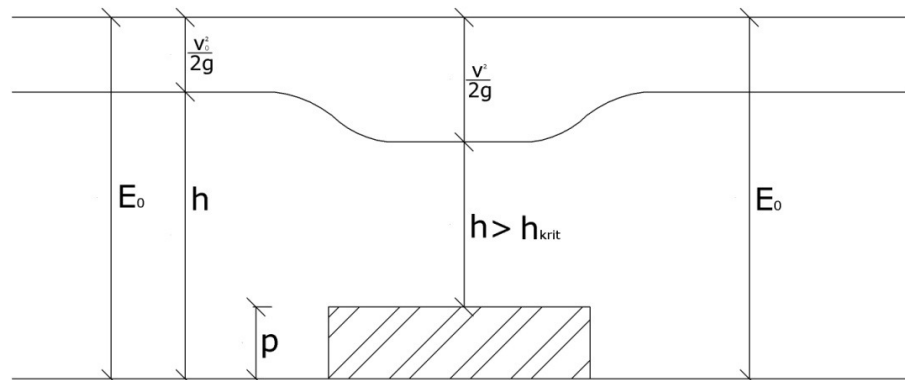


Slika 49: Opis prefabriciranega turbinskega modula

5.5 Prevajanje visokih voda

Pri prevajanju visokih voda, nas zanima kakšne razmere se vzpostavijo na pregradi in dolvodno od nje. Pri prelivanju čez pragu nas je zanimal njegov vpliv na zaježitev pri stoletnih poplavnih vodah, oziroma če do zaježbe sploh pride. Izračuni so bili narejeni z naslednjimi predpostavkami:

- pravokotno korito struge tik pred pregrado
- višina gladine (h) je določena v računskem hidravličnem modelu
- izračun je narejen za eno pretočno polje Pragu Ponoviče



Slika 50: Široki prag (Steinman, 1999)

$$Q_1 = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$h = 7,6 \text{ m}$$

$$S = 325 \text{ m}^2$$

$$b = 45 \text{ m}$$

$$p = 1,5 \text{ m}$$

$$v_0 = \frac{Q}{S} = 3,69 \text{ m/s} \quad (2)$$

$$E_0 = h + \frac{v_0^2}{2 \cdot g} = 8,29 \text{ m} \quad (3)$$

Iz pogoja $F_r = 1$ sledi $\frac{Q^2 \cdot b}{g \cdot S^3} = 1$ (4)

izrazimo h_{krit} $h_{krit} = \left(\frac{Q^2}{b^2 \cdot g} \right)^{\frac{1}{3}} = 4,17 \text{ m}$ (5)

$$v_{krit} = \frac{Q}{b \cdot h_{krit}} = 6,40 \text{ m/s} \quad (6)$$

$$E_0 = h_{krit} + \frac{v^2}{2 \cdot g} + p_{max} \quad (7)$$

$$p_{max} = E_0 - h_{krit} - \frac{v^2}{2 \cdot g} = 2,03 \text{ m} \quad (8)$$

$$p < p_{max} \quad (9)$$

Robni pogoji dolvodno narekujejo takšne razmere, da se na pragu nikjer ne pojavi prerez s kritično globino in torej ni prehoda v deroči tok. Nad pragom se pojavi le lokalno znižanje gladine (Steinman, 1999).

Izračun torej pokaže, da načrtovani prag ne povzroči dvig gladine gorvodno od pregrade pri prevajanju visokih voda. Z umestitvijo pragov tako ne poslabšujemo obstoječe poplavne varnosti obravnavanega odseka pri Litiji, ampak jo z načrtovanimi poglobitvami dna struge in izgradnje visokovodnih nasipov izboljšujemo.

5.6 Preračun stabilnosti jezovne zgradbe

Izračun je bil narejen pod naslednjimi predpostavkami:

- pregrada je temeljena na kvalitetno hribinsko podlago $\phi = 35^\circ$
- težo hidromehanske opreme zanemarimo
- pri računu upoštevamo vzgon
- izračun je podan v Prilogi E

5.6.1 Rezultanta delujočih sil

Preglednica 6: Rezultante delujočih sil

Horizontalne sile:

Vertikalne sile:

$F_H = 6\,220\text{ kN}$	$\Sigma F_H = 6\,220\text{ kN}$
$Fg^{plošči} = 40\,000\text{ kN}$	$\Sigma F_V = 26\,635\text{ kN}$
$Fg^{stebri} = 20\,000\text{ kN}$	
$F_{vzg} = -51\,460\text{ kN}$	
$F_V = 4\,275\text{ kN}$	
$F_{JEZU} = 8\,550\text{ kN}$	
$F_W = 5\,000\text{ kN}$	

Koeficient varnosti proti zdrs:

$$\phi = 35^\circ$$

$$\mu = \frac{\Sigma F_V * \operatorname{tg} 35}{\Sigma F_H} = \frac{26635 * \operatorname{tg} 35}{6220} = 2,03 \quad (10)$$

Koeficient je znotraj dovoljenih vrednosti.

6 HIDROTEHNIČNE UREDITVE

6.1 Mestni profil

Pri urejanju mestnega obrečnega prostora lahko najdemo veliko primerov dobre prakse, ki jih je možno prenesti na obravnavan odsek pri Litiji. Eno takšnih mest je Beljak, ki se nahaja na vplivnem območju akumulacijskega jezera reke Drave.



Slika 51: Primer dobre prakse obrečnega prostora v mestnem profilu (www.vhsktn.at)

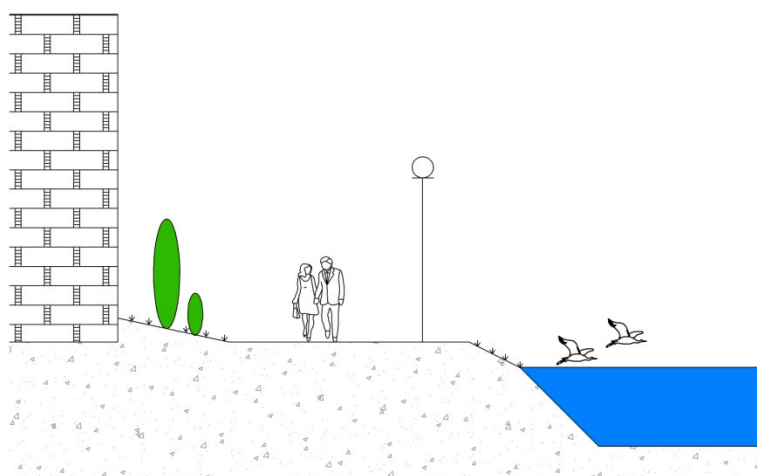
Če primerjamo Sliki 51 in 52 lahko ugotovimo, da je še veliko možnosti in prostora za izboljšanje podobe mesta Litija. Z ureditvijo brežin in sprehajalnih / rekreacijskih poti bomo reko približali prebivalcem in tako omogočili razvijanje turističnih potencialov, ki jih to območje nedvomno ima. Z dodatno premostitvijo bomo levi in desni breg mesta še bolj povezali, tako da bo Litija prepoznana kot celostno mesto, ki ga reka ne ločuje ampak mu prinaša dodano vrednost.



Slika 52: Stanje brežin v mestnem profilu v Litiji

Z umestitvijo Pragu Litija smo gladino vode v mestnem profilu dvignili na koto 232,0 m in ohranili oziroma še izboljšali vizualno podobo reke Save. Tako se ponujajo možnosti za ureditev mestnega obrečnega prostora ob akumulirani vodi.

Na levem bregu reke Save se nahaja protipoplavni zid s katerim varujemo objekte, ki se nahajajo na območju med reko in železnico. Omenjeni zid zaradi varovanja območja ohranimo v celoti, vendar pa uredimo brežino pod njim v sprehajalno pot (Slika 53). Urejena sprehajalna pot se razteza vzdolž celotnega mestnega profila in se nato naveže na Prag Litija. Ureditve brežine morajo biti načrtovane tako, da kljubujejo visokim vodam in je škoda omejena le na čiščenje plavja in plavin. Lokacije načrtovanih ureditev so prikazane v Prilogi A 3.



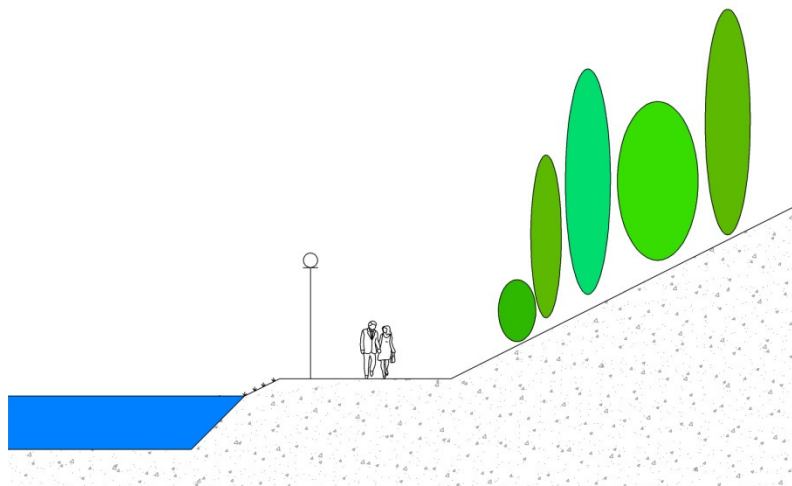
Slika 53: Ureditev sprehajalne poti na levem bregu reke Save vzdolž protipoplavnega zidu

Ker suhoparni betonski zid ni ravno najboljša kulisa za sprehajalno pot, predlagamo posodobitev zidu s kameno oblogo med katero namestimo plezalne oprimke in zid spremenimo v plezalno steno (Slika 54). Območje bomo tako približali mlajšim prebivalcem, ki potrebujejo prostor in infrastrukturo za prostočasne rekreativne dejavnosti.



Slika 54: Več funkcijski protipoplavni zid (www.freeclimbers.at)

Brežina na desnem bregu reke Save je zasnovana kot sprehajališče z sonaravno parkovno ureditvijo na pobočju brežine (Slika 55). Ureditev se razteza od cestnega mostu do pragu Litija dolvodno od Litije.



Slika 55: Sonaravno oblikovana brežina na desnem bregu reke Save

6.2 Izven mestni profil

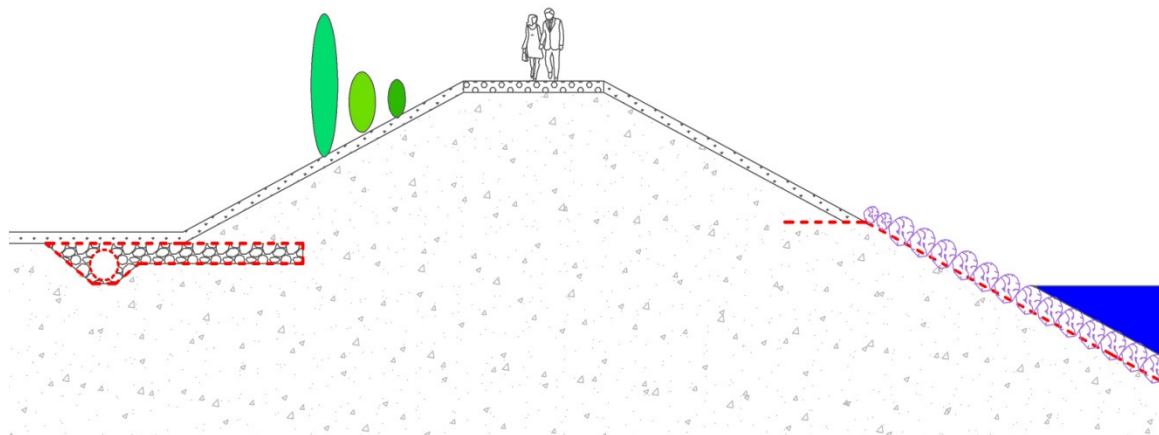
Pri urejanju brežin izven mesta ločimo ureditve izvedene na obstoječih brežinah in ureditve na načrtovanih visokovodnih nasipih.

Zaradi manjšega dviga gladine niso potrebna obrežna zavarovanje vzdolž celotnega odseka. Kjer obratovalna gladina ne prestopi osnovne struge lahko ohranjamo naravno oblikovane in zasajene rečne brežine. Tako ohranjamo naravni habitat za rastline in živali. Tu se predvideva izgradnja nasute vzdrževalne poti (Slika 56), ki je prvotno namenjena vzdrževanju brežin, služi pa tudi kmetijski mehanizaciji, kolesarjem in sprehajalcem.



Slika 56: Nasuta vzdrževalna pot in naravno zaraščena brežina (DESNO) na Pijavškem polju ob akumulaciji HE Krško

Prav tako poteka vzdrževalna pot po kroni nasipa (Slika 57). Pri ureditvah na visokovodnih nasipih je pomembno, da z izbranimi ukrepi ne vplivamo na stabilnost in s tem na varnost samega nasipa.



Slika 57: Ureditve na visokovodnem nasipu

7 ZAKLJUČEK

V diplomskem delu smo se ukvarjali z optimizacijo zasnove verige hidroelektrarn na srednji Savi na odseku pri Litiji. Derivacijska hidroelektrarna Ponoviče predstavlja velik poseg v prostor in bo s svojim delovanjem močno vplivala na dosedanji rečni režim na odseku pri Litiji. Pomisleki lokalne skupnosti so legitimni in eksplicitno navedeni v pogojih predstavljenih na javni razpravi. V diplomski nalogi so prikazane možnosti in ureditve, s katerimi lahko zainteresirani javnosti pokažemo, da se s preusmeritvijo reke Save ponujajo tudi nove možnosti in priložnosti. Iskali smo najboljše rešitve, da bi Litiji in okolici omogočili nadaljnji razvoj, zvišali kvaliteto prostora in poskrbeli za protipoplavno zaščito. Nadgradili smo že obdelano varianto s pragovi z namenom umeščanja v prostor s čim manj škodljivimi vplivi ter hkrati še zagotavljati normalne obratovalne pogoje za proizvodnjo električne energije.

Naredili smo tehnični pregled zasnove verige hidroelektrarn na srednji Savi. Opisali smo koncesijsko uredbo, režim obratovanja, načrtovane objekte in ureditve. Še posebej podrobno smo obravnavali odsek pri Litiji, kjer predinvesticijska študija predvideva izgradnjo dveh pragov. Naredili smo računski hidravlični model s katerim smo dobili osnovo za primerjalno analizo med načrtovanimi rešitvami. Rezultat modela je vzdolžni profil obravnavanega odseka z gladinskimi krivuljami pri različnih pretokih. Predlagano zasnovo z dvema pragoma (Litija I in Litija II) smo vnesli v model in dobili zajezne krivulje. Prag Litija I povzroči dvig gladine na koto 238 m, ki se približa robu osnovne struge v pregradnem profilu. Posledica tega je izgradnja nasipa na desni strani v dolžni 500 m, nadvišanje kmetijskih zemljišč v velikosti 10 ha in zavarovanje levega brega, kjer poteka državna cesta in železnica. Prag Litija II je lociran tik ob strojnici HE Ponoviče, kjer je pomanjkanje prostora za umestitev takšne pregrade. Tudi tukaj je težava z nadvišanji kmetijskih zemljišč (70 ha) zaradi dviga podtalnice, hkrati pa dvig zajezne gladine skozi mesto ni zadosten. Predlagana zasnova po našem mnenju ni optimalna z prostorskega in okoljskega vidika. Takšna ureditev je v nasprotju z prvotno načrtovanimi kriteriji, ki predvidevajo manjše posege v strugo reke.

Zaradi drugačnega koncepta, ki namesto optimalne energetske izrabe predvideva boljšo okoljsko sprejemljivost, smo poskušali optimizirati predlagano zasnovo. Odločili smo se za izgradnjo treh manjših pragov, ki bodo imeli manjši vpliv na okolje in bodo zagotavljali ustrezno vodno gladino vzdolž celotnega odseka. Po pridobitvi situacije in terenskem ogledu odseka je bilo potrebno določiti njihove mikrolokacije. Pregradni profil smo izbrali s pomočjo več kriterijev. Najpomembnejši je bil vzdolžni profil, saj smo lahko z njim ocenili potrebne hidrotehnične ureditve in gradbena dela. Pomemben kriterij je tudi sama lokacija pragu, ki mora omogočati odprtje gradbene jame in enostaven dostop do gradbišča. Za vsak prag smo določili zajezno gladino, ki je kompromis med gladino pri Q_{sr}

in Q_{es} vzdolž akumulacije. Gladina vode bo pri ekološko sprejemljivem pretoku Q_{es} dovolj visoko, da bo zagotavljala pogled na ojezerjeno strugo.

Prag Podšentjur je na isti lokaciji kot v predhodni zasnovi, vendar smo bistveno zmanjšali dimenzije objekta. Zaradi nižje zajezne gladine na koti 235,5 m ni potrebno nadvišanje kmetijskih zemljišč v tolikšnem obsegu. Dodatni prag (prag Litija) se nahaja pod mestom Litija in zagotavlja zaježno gladino na koti 232,0 m s čimer zagotovimo pogled na ojezerjeno vodno telo vzdolž celotnega mesta. Vzdolžni profil pokaže, da je zajezna gladina skozi mesto zelo izenačena z gladino pri Q_{sr} oziroma jo v bližini pragu tudi presega. Tako smo rešili vprašanje izdatnosti vodne vrtine v Litiji, ki bi se ob nižjem vodostaju podtalnice lahko zmanjšala. Dvig gladine omogoča zasnovo kvalitetnih obvodnih ureditev s sprehajalnimi in rekreacijskimi potmi. S premostitvijo na pragu pa bo mesto še bolj povezano v celoto. Na obeh bregovih je v dolžini 500 m predviden visokovodni nasip, s katerim varujemo urbanizirane površine pred stoletnimi poplavnimi vodami. Prag Ponoviče je pomaknjen gorvodno od strojnice HE Ponoviče, s koto zaježitve na 228,5 m. V primerjavi s predhodno zasnovo je to 2,5 m nižje in zato niso potrebni ukrepi za nadvišanje kmetijskih zemljišč. Prag je pomemben zaradi zagotavljanja protipoplavne varnosti naselja Ponoviče in strojnice HE Ponoviče, ki jih varujemo s protipoplavnim nasipom na levem bregu reke Save. Desna stran ostaja retenzijsko območje, namenjeno razlivanju poplavnih voda. Nasip se nadaljuje tudi dolvodno do omenjene strojnice, kjer se priključi na odvodni kanal. Zaradi zadostnega dviga gladine vzdolž celotnega odseka ne pričakujemo težav z zaraščanjem struge reke Save. Vendar pa je potrebno, glede na izkušnje na reki Dravi, zagotoviti ustrezno vzdrževanje vodotoka s čiščenjem zarasti, odstranjevanjem odloženih naplavin in sanacijo poškodovanih brežin. V gorvodnem delu akumulacije bo potrebno poglobljanje dna struge v dolžini 1 km na koto 228,0 m. Izkopane količine bodo uporabljene pri gradnji nasipa na levem bregu reke Save. Čeprav energetski vidik ni v prvotnem planu pri načrtovanih ureditvah, pa je smiselno, da pragove izkoristimo za proizvodnjo električne energije. Pragovi tako postanejo večnamenski objekti, ki s prihodkom od prodaje električne energije prinašajo dodano vrednost v lokalno okolje.

Pregrado smo zasnovali kot široki prag z gumeno membrano, ki je v Sloveniji uporabljena na več jezovih. Pregrada je sestavljena iz dveh prelivih polj dolžine 45 m in strojnice. Med prelivnima poljema je vmesni steber, ki služi za pritrditev gumene membrane. Gumeni jezovi imajo to prednost, da se pri višjih pretokih izpraznijo in ne predstavljajo ovire vodi pri pretoku čez pregradni profil. Kot je prikazal izračun, prag ne povzroči zajezbe gorvodno (pri visokih vodah), ampak pride le do lokalnega znižanja gladine.

Strojnica je zasnovana zelo enostavno v obliki kanala, v katerega se vstavi prefabricirani turbinski modul z dvema Straflomatrix turbinama. Takšne turbine v Sloveniji še niso bile uporabljene, vendar pa so zelo primerne za pregrade z majhnimi padci in pretoki. Gre za modificirano cevno turbino s

sinhronim generatorjem, ki omogoča enostaven priklop na obstoječe električno omrežje. Sistemi manevriranja z jezom in turbinami so vodeni avtomatsko. Samo v primeru napovedanih poplavnih voda, bo potrebno turbinski modul dvigniti iz vode. To bo omogočeno dežurni ekipi s portalnim žerjavom na samem objektu.

Za obravnavani zasnovi odseka sta narejeni problemski karti na katerih so označeni načrtovani pragovi, nasipi, poglobitev struge, nadvišanje zemljišč in ureditve obvodnega prostora. Naredili smo enostavne zasnove ureditve obvodnega prostora v mestnem profilu kot tudi zunaj mesta.

Po terenskem ogledu odseka verjamemo, da ima Litija z načrtovanimi ureditvami vse možnosti, da se bolj naveže na reko in izkoristi obvodni prostor tako, da bo koristil lokalnemu prebivalstvu in turističnemu gospodarstvu.

VIRI

Andritz hydro. 2012. Hydromatrix.

<http://atl.g.andritz.com/c/com2011/00/01/24/12429/1/1/2/345644646/hy-hydromatrix-en.pdf>

(Pridobljeno 29. 10. 2012.)

Četina, M., 2007. Izdelava predinvesticijske tehnično prostorske dokumentacije za HE na srednji Savi. Sklop: Hidravlični model gladin v sedanjem in bodočem (zajeznem) stanju za odsek srednje Save med HE Medvode in HE Vrhovo ter v fazi gradnje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 23 str.

Direktiva 2009/28/ES Evropskega parlamenta in sveta o spodbujanju uporabe energije iz obnovljivih virov.

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Geateh. 2007. Mape 1 - 5. Predinvesticijska študija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: loč. pag.

Gebhardt, M. 2007. Stand der Schlauchwehrtechnik, Anwendungsbeispiele und Betriebserfahrungen. Hidravlične meritve gumenih jezov. Karlsruhe, Bundesanstalt für Wasserbau: 9 str.

GZS - Gospodarska zbornica Slovenije. 2011. Nujno je nadaljevanje izgradnje verige na spodnji Savi. Sporočilo za javnost. http://mediji.gzs.si/slo/sporocila_za_javnost/53605 (Pridobljeno 4. 11. 2012.).

Husain, Z. 2012. Operating range StrafloMatrix . Osebna komunikacija. (Pridobljeno 22. 6. 2012.)

IBE. 1988. Študija o možnostih in pogojih izgradnje hidroenergetskih in vodnogospodarskih objektov na Savi v Ljubljani. Ljubljana. Neobjavljeno gradivo.

Krofl, N., Zidar, K., Jerant, A. 2012. Smernice in usmeritve Občine Litija za načrtovanje prostorskih ureditev k državnemu prostorskemu načrtu za HE Renke, HE Trbovlje in HE Suhadol na srednji Savi. http://www.litija.si/external/obcinski_svet2010-14/11os2010-14/ad%204.pdf

(Pridobljeno 4. 11. 2012.)

Kryžanowski, A. et al. 2006. Hidroelektrarne na srednji Savi. V: 17. Mišičev vodarski dan, Maribor, 14.12.2006.: 43-46 str.

Kryžanowski, A., Rosina, J. 2012. Izraba vodnih sil v Sloveniji. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 15 str.

MG - Ministrstvo za gospodarstvo Republike Slovenije. 2011. Javna razprava o energetske politiki Slovenije. Gradivo za novinarje.

MOP DzP - Ministrstvo za okolje in prostor, Direktorat za prostor. 2012. Pobuda za pripravo državnega prostorskega načrta za HE Renke, HE Trbovlje in HE Suhadol na srednji Savi.

http://www.trbovlje.si/assets/attachments/4283/naznanilo_pobuda_srednjaSava.pdf

(Pridobljeno 29. 10. 2012.)

OdSPRS - Odlok o strategiji prostorskega razvoja Slovenije. Uradni list RS št. 76/2004: 9217.

Priloga območje izvajanja koncesije in pogoji, pod katerimi se izvaja koncesija za rabo vode za proizvodnjo električne energije na delih vodnega telesa srednje Save. Uradni list RS št. 121/2004.

Rajh, D., Dobnikar, V., Milič, J. 2002. Gradbeni vidik posodobitve objektov hidroelektrarn na reki Dravi. Prispevek v zborniku. V: Kryžanowski, A. (ur.) in Širca, A. (ur.). Tehnologije v pregradnem inženirstvu – novejša izvedbena dela na slovenskih pregradah. Zbornik prispevkov. 4. posvetovanje SLOCOLD. Junij, 2002. Fala: 59-75.

Savatech. 2012. Water flow management. Prospekt. Osebna komunikacija.

(Pridobljeno 5. 9. 2012.)

Steinman., F. 1999. Hidravlika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 295 str.

Suhadolnik, A. 2007. Kako vzdrževati strugo reke Drave in gospodariti z vodo (med Mariborom in Zavrčem). V: 18. Mišičev vodarski dan, Maribor, 10. 12. 2007: 174-176 str.

SURS - Statistični urad Republike Slovenije. 2012. Letna bilanca proizvodnje in porabe električne energije. Ljubljana, Statistični letopis RS 2012: str. 349.

SURS - Statistični urad Republike Slovenije. 2012. Proizvodnja električne energije na pragu, 2011. Ljubljana, Statistični letopis RS 2012: str. 355.

SURS - Statistični urad Republike Slovenije. 2012. Proizvodnja električne energije po vrstah proizvajalcev in moči objektov 2011. Ljubljana, Statistični letopis RS 2012: str. 350.

Trampuž, M. 2006. Ureditev Savinje v območju Luč. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Trampuž): 58 str.

Urbančič, A. et al. 2011. Osnutek predloga Nacionalnega energetskega programa Republike Slovenije za obdobje do leta 2030. Aktivno ravnanje z energijo. Ljubljana, Inštitut Jožef Štefan.
http://www.mg.gov.si/fileadmin/mg.gov.si/pageuploads/Energetika/Zelena_knjiga_NEP_2009/NEP_2010_2030/NEP_2030_jun_2011.pdf (Pridobljeno 4. 11. 2012.)

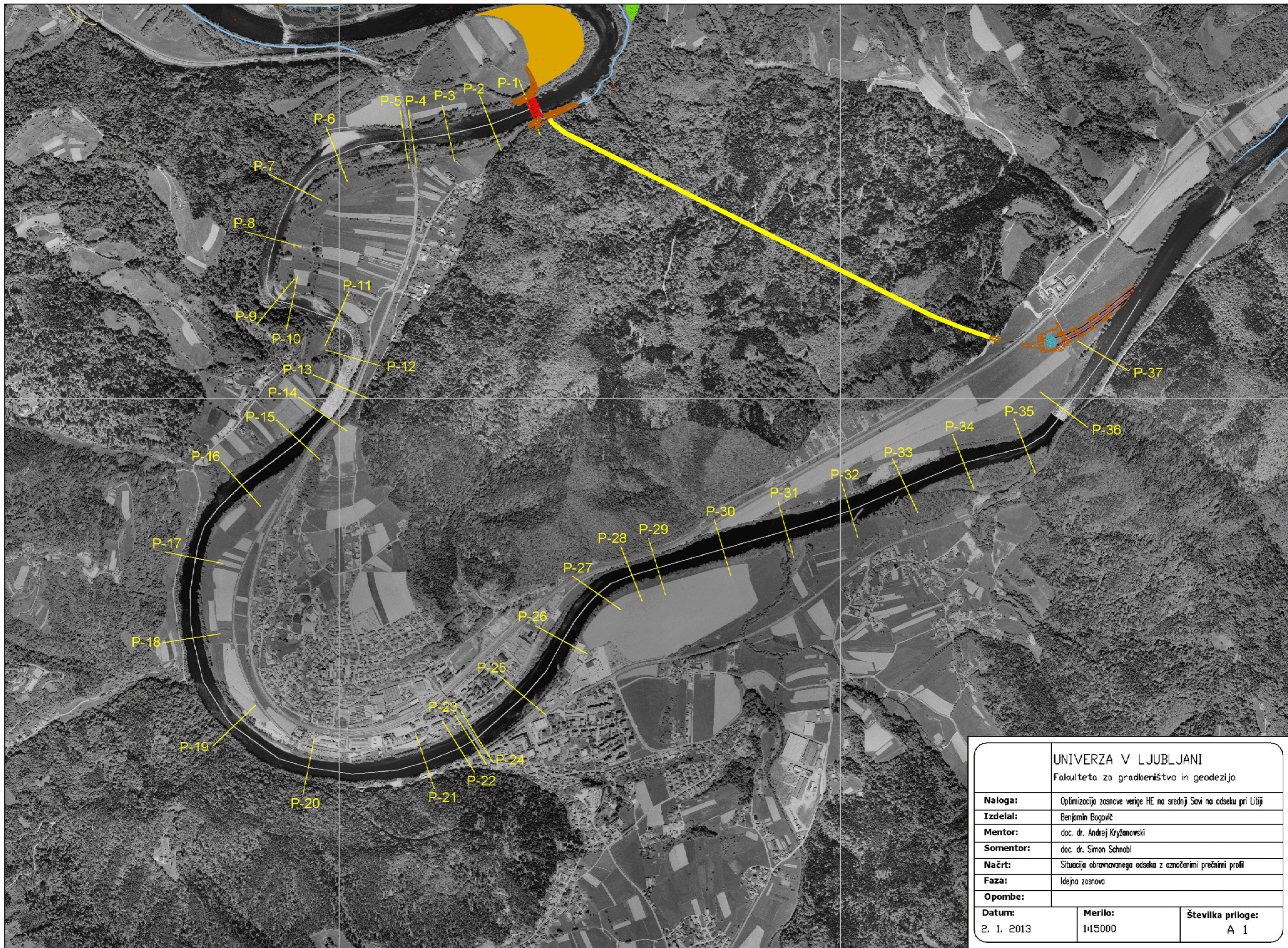
Uredba o koncesiji za rabo vode za proizvodnjo električne energije na delu vodnega telesa reke Save od Ježice do Suhadolega. Uradni list RS št. 121/2004.

Uredba o spremembah in dopolnitvah Uredbe o koncesiji za rabo vode za proizvodnjo električne energije na delu vodnega telesa reke Save od Ježice do Suhadola. Uradni list RS št. 76/2011.

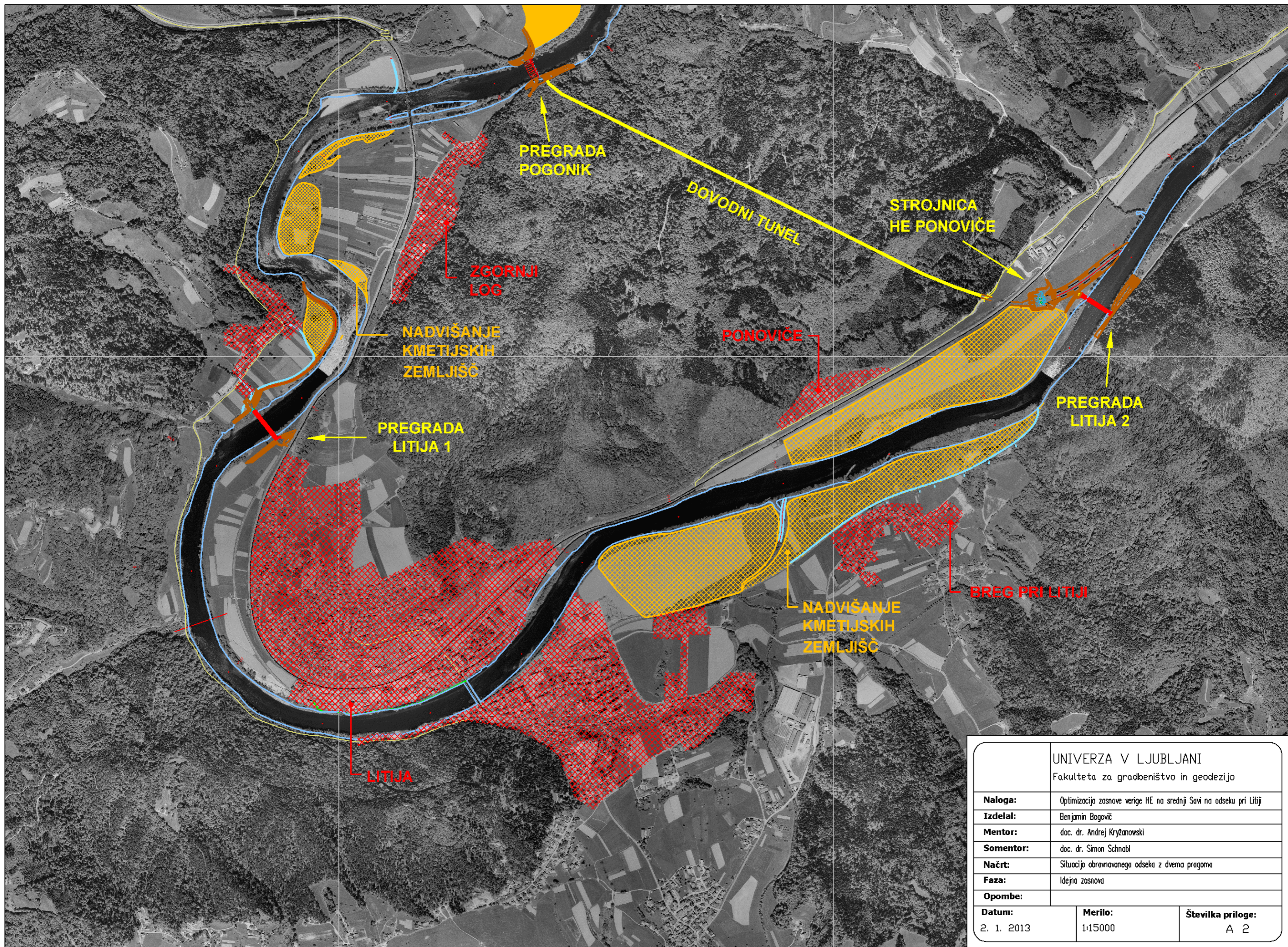
Žerdin, M. et al. 2011. Okoljsko poročilo za celovito presojo vplivov na okolje za Nacionalni energetske program (obdobje 2010-2030). Aquarius d.o.o. Ljubljana.
http://www.mzip.gov.si/fileadmin/mzip.gov.si/pageuploads/Energetika/Zelena_knjiga_NEP_2009/NEP_2010_2030/OP_VO_NEP_2011.pdf (Pridobljeno 4. 11. 2012.)

PRILOGE

- Priloga A: SITUACIJA OBRAVNAVANEGA ODSEKA (3 str.)
- Priloga B: PREČNI PREREZI NAČRTOVANIH PRAGOV (3 str.)
- Priloga C: DIMENZIONIRANJE SKALOMETNE OBLOGE (2 str.)
- Priloga D: GRAFIKON OBMOČJA DELOVANJA STRAFLOMATRIX TURBIN
- Priloga E: PRERAČUN STABILNOSTI PREGRADE (3 str.)

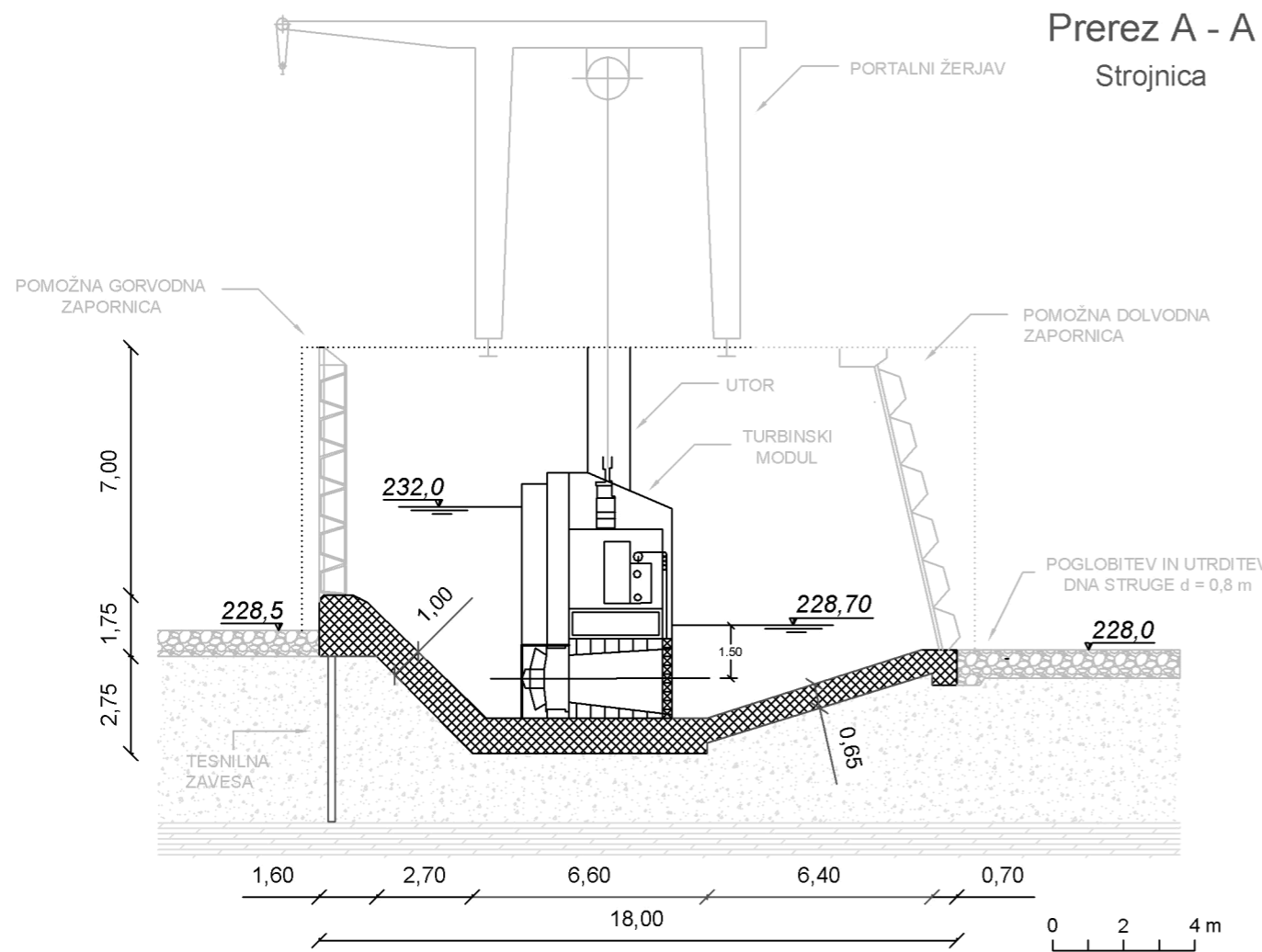


UNIVERZA V LJUBLJANI		
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo		
Naloga:	Optimizacija zasnove verige HE na srednji Savi na odseku pri Litiji	
Izdelal:	Benjamin Bogovič	
Mentor:	doc. dr. Andrej Kryžanowski	
Somentor:	doc. dr. Simon Schnabl	
Načrt:	Situacija obravnavanega odseka z označenimi prečnimi profili	
Faza:	Idejna zasnova	
Opombe:		
Datum:	Merilo:	Številka priloge:
2. 1. 2013	1:15000	A 1

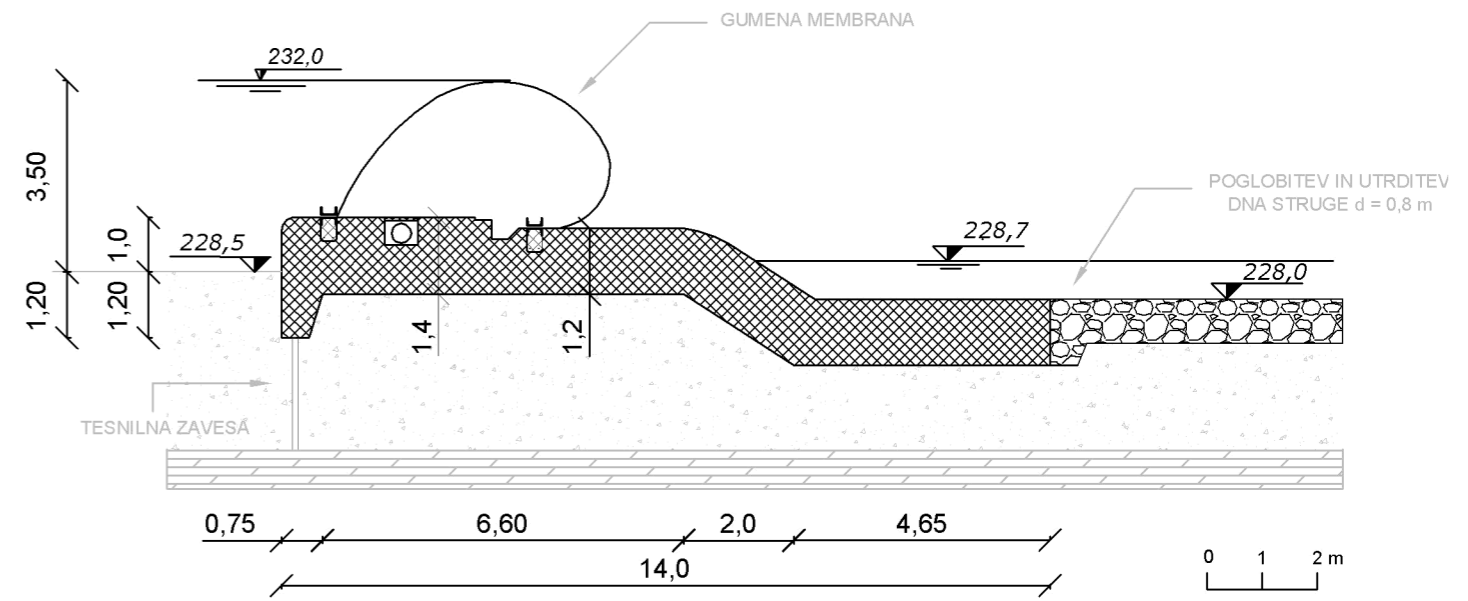


UNIVERZA V LJUBLJANI Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo		
Naloga:	Optimizacija zasnove verige HE na srednji Savi na odseku pri Litiji	
Izdela:	Benjamin Bogovič	
Mentor:	doc. dr. Andrej Kryžanowski	
Somentor:	doc. dr. Simon Schnabl	
Načrt:	Situacija obravnavanega odseka z dverno pragoma	
Faza:	Idejna zasnova	
Opombe:		
Datum: 2. 1. 2013	Merilo: 1:15000	Številka priloge: A 2

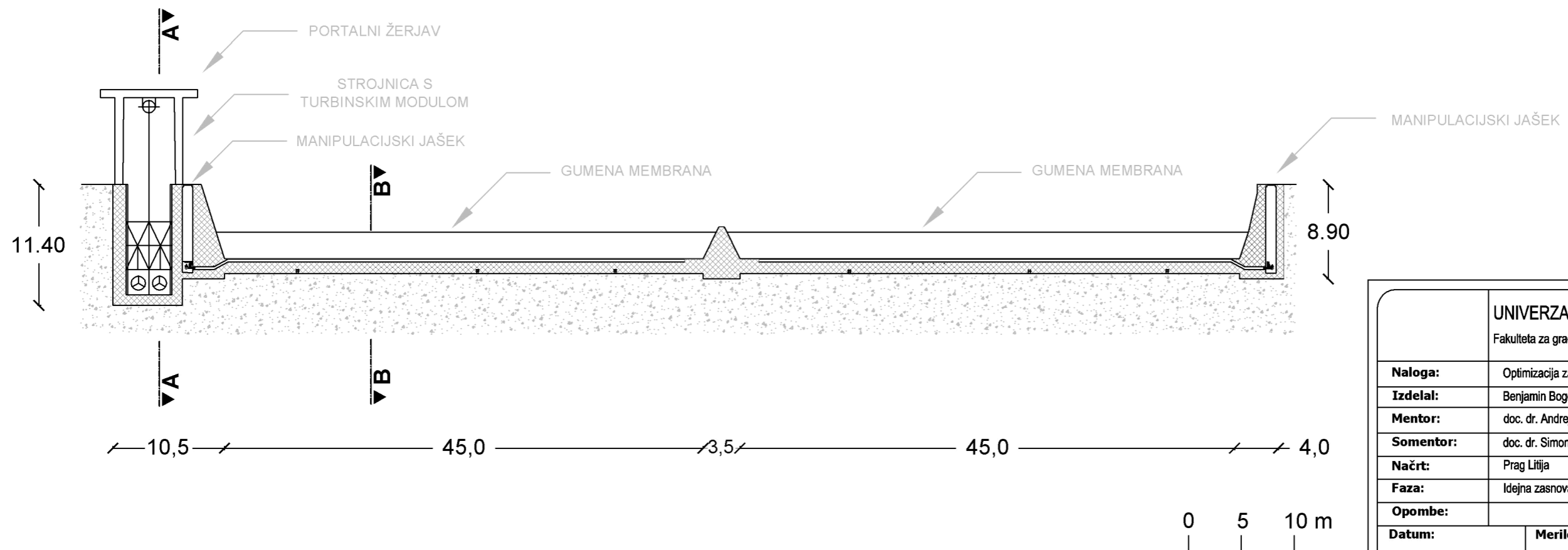
Prerez A - A
Strojnica



Prerez B - B
Prelivno polje



Vzdolžni prerez pregrade

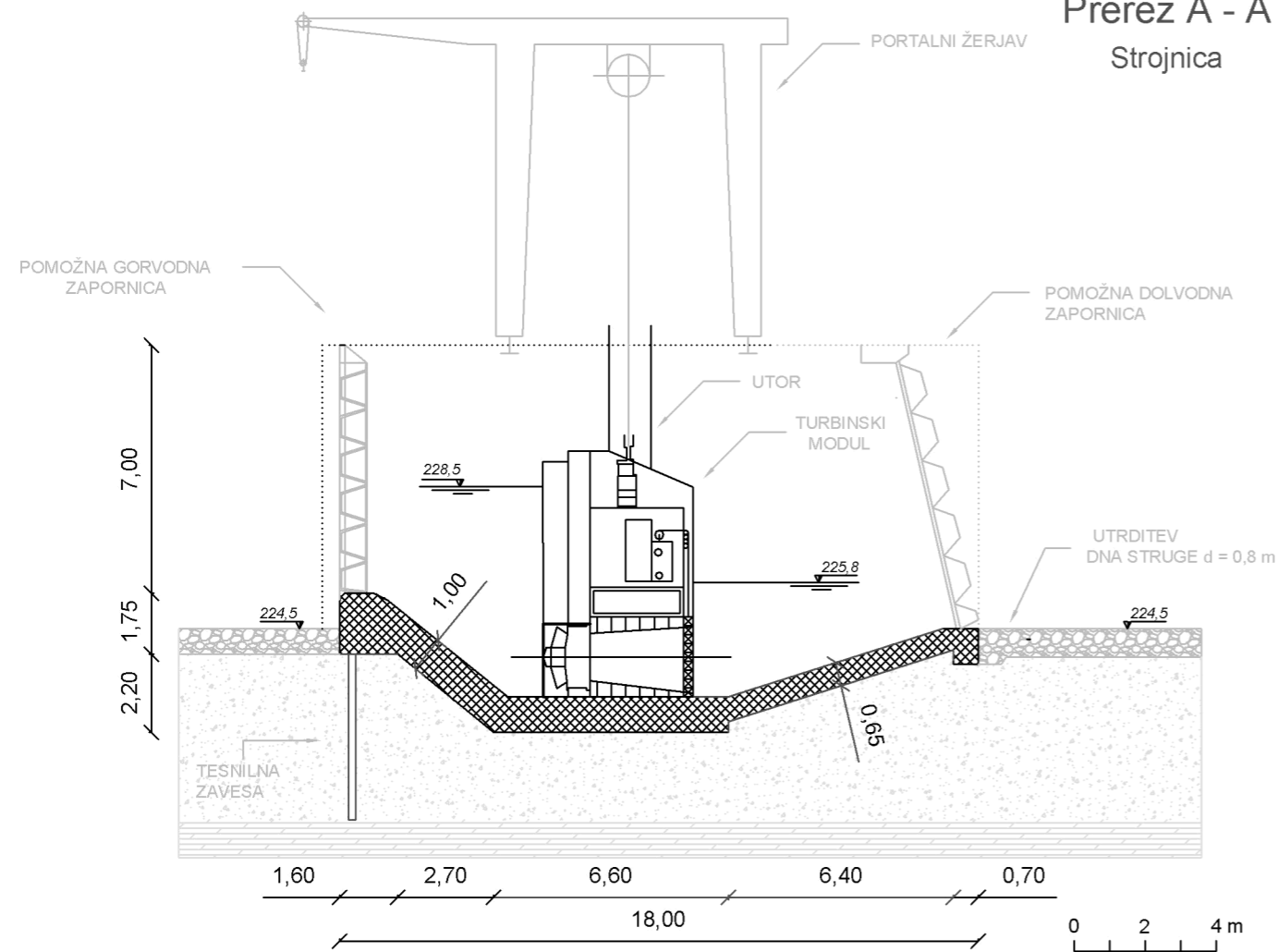


UNIVERZA V LJUBLJANI
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

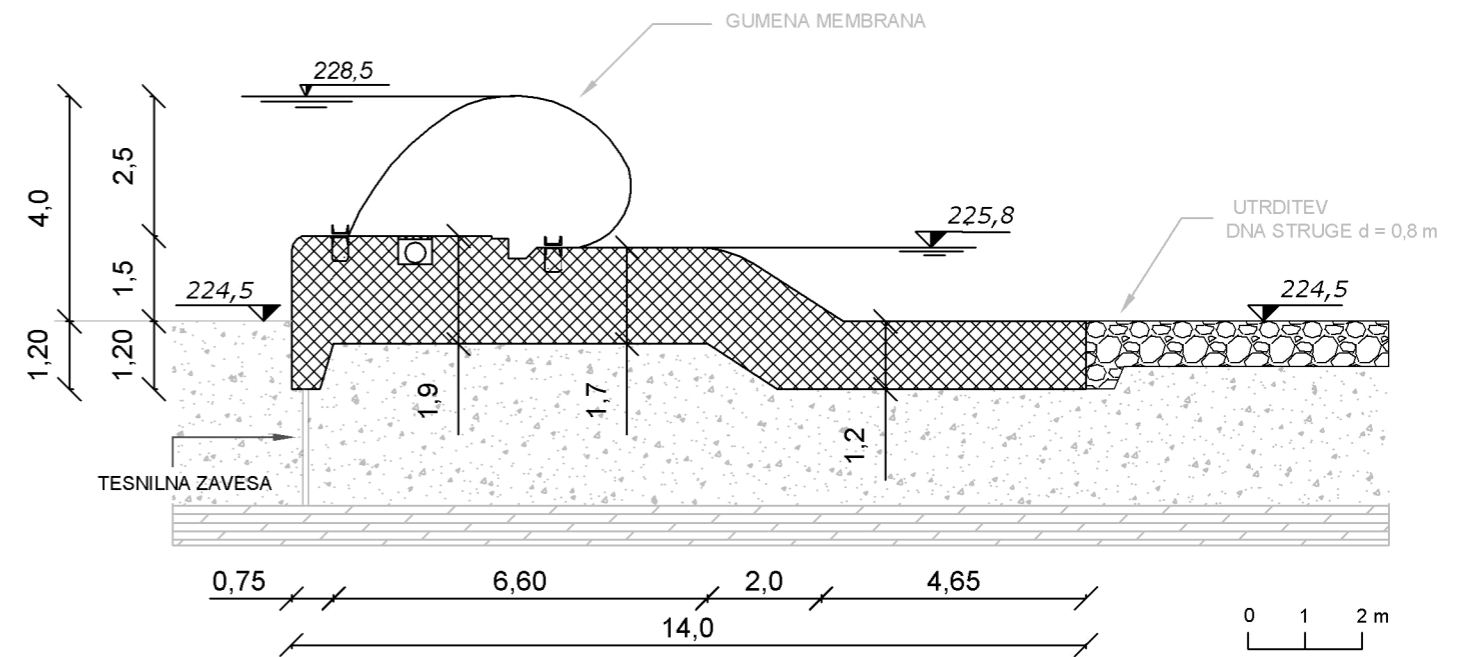
Naloga:	Optimizacija zasnove verige HE na srednji Savi na odseku pri Litiji
Izdelal:	Benjamin Bogovič
Mentor:	doc. dr. Andrej Kryžanowski
Somentor:	doc. dr. Simon Schnabl
Načrt:	Prag Litija
Faza:	Idejna zasnova
Opombe:	

Datum: 2. 1. 2013	Merilo:	Številka priloge: B 2
-----------------------------	----------------	---------------------------------

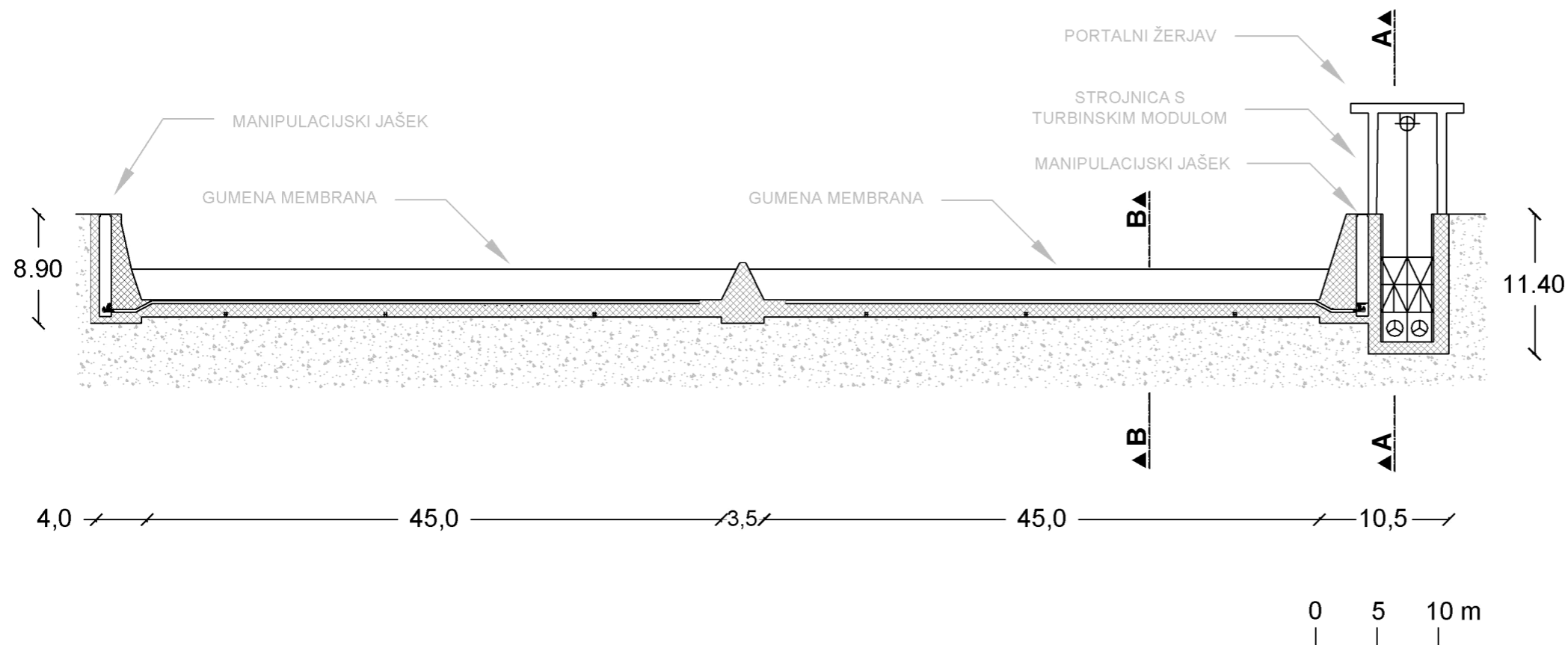
Prerez A - A
Strojnica



Prerez B - B
Prelivno polje



Vzdolžni prerez pregrade



UNIVERZA V LJUBLJANI Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo		
Naloga:	Optimizacija zasnove verige HE na srednji Savi na odseku pri Litiji	
Izdelal:	Benjamin Bogovič	
Mentor:	doc. dr. Andrej Kryžanowski	
Somentor:	doc. dr. Simon Schnabl	
Načrt:	Prag Ponoviče	
Faza:	Idejna zasnova	
Opombe:		
Datum: 2. 1. 2013	Merilo:	Številka priloge: B 3

PRILOGA C: DIMENZIONIRANJE SKALOMETNE OBLOGE

Delec, ki miruje na ravnem dnu vodotoka, spravi v gibanje vlečna sila, ki jo povzroči voda, ki teče preko tega delca. Če pa se tak delec nahaja na brežini vodotoka, deluje nanj tudi gravitacija, ki ga sili, da se bo zakotalil navzdol. Če je rezultanta teh dveh sil večja kot sila odpora, (tj. teža in kohezija), se na brežinah pojavi erozija (Steinman, 1999).

Za dimenzioniranje velikosti skalometne obloge smo uporabili enačbe Escramia in May (1992) cit.po Trampuž, M. (2006). Ker nas zanima najbolj neugodna obtežba (visoki pretoki), izberemo v Preglednici C1 vrednost turbulence $TI = 0,6$.

Preglednica C1: Turbulentna napetost po Escramia in May (1992), cit.po Trampuž, M. (2006)

NIVO TURBULENCE	
PO VREDNOSTI	TURBOLENTNA NAPETOST TI
NORMALNA (nizka)	0,12
NORMALNA (višja)	0,2
SREDNJA DO VISOKA	0,35 - 0,5
ZELO VISOKA	0,6

Srednji premer kamna določimo po enačbi:

$$D_{n50} = C \frac{u_b^2}{2g(s-1)}$$

D_{n50} ... srednji premer kamna

C ... koeficient za različne tipe oblog, ki upošteva turbulentno napetost TI

g ... gravitacijski pospešek

$s = 2,65$... relativna specifična teža materiala obloge

U_b ... hitrost v bližini dna (na 10 % pretočne globine)

Glede na tip obloge določimo vrednost koeficienta C iz Preglednice C2.

Preglednica C2: Vrednost C - ja po Escramia in May (1992), cit.po Trampuž, M. (2006)

TIP OBLOGE	VREDNOST C-ja	OPOMBE
skalomet	$12,3 * TI - 0,2$	Vrednost za $TI \geq 0,05$ in za dim. brežine in dna, nagib 1:2 ali več
prosti betonski bloki	$9,22 * TI - 0,15$	Vrednost za $TI \geq 0,05$ in za dim. brežine in dna, nagib 1:2,5 ali več
gabioni	$12,3 * TI - 1,65$	Vrednost za $TI \geq 0,05$ in za dim. brežine in dna, nagib 1:2 ali več

$$U_b = (- 1,48 * TI + 1,36) * U_d$$

$U_d = 3,2$ m/s (predpostavka)

U_d ... povprečna hitrost v vertikalni smeri

Sedaj lahko izračunamo vse potrebne podatke:

$$C = (12,3 * 0,6 - 0,2) = 7,18$$

$$U_b = 1,51 \text{ m/s}$$

$$D_{n50} = 0,506 \text{ m}$$

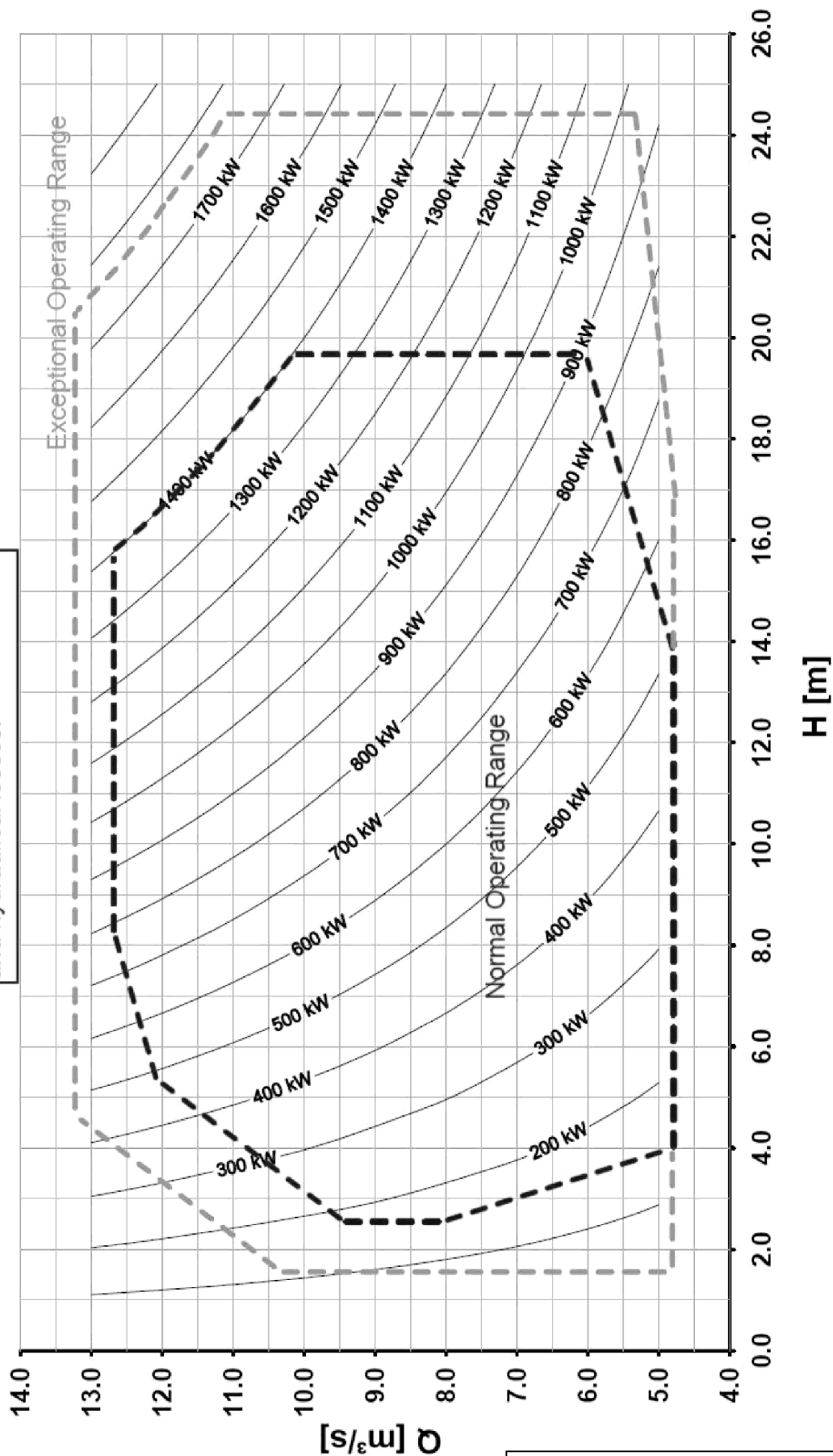
Premer povprečne skale, ki bo uporabljena v skalomentni oblogi znaša 0,5 m.

Operating Range StrafloMatrix™

Output of one TG - unit

HYDROMATRIX -Operating range
Output includes already all electrical
and hydraulical losses.

Runner diameter = 1320 [mm]

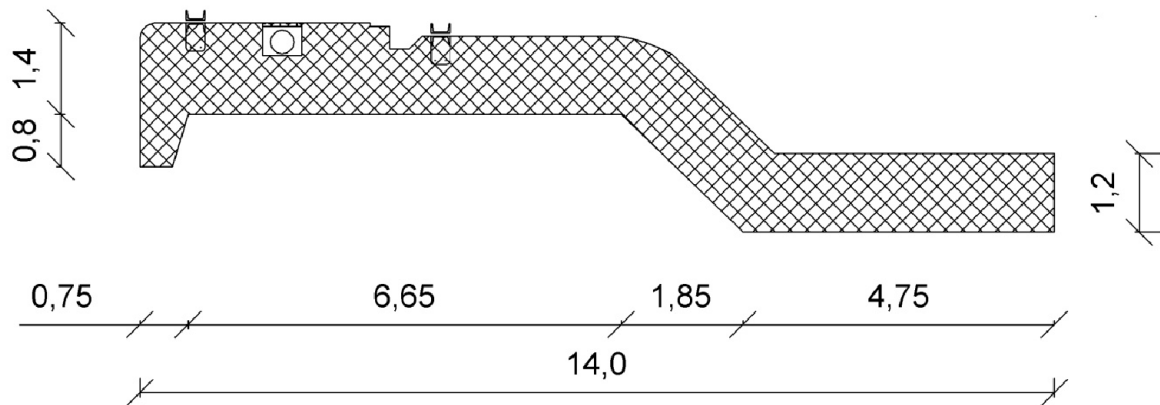


UNIVERZA V LJUBLJANI Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo		
Naloga:	Optimizacija zasnovne verige HE na srednji Savi na odseku pri Litiji	
Izdelal:	Benjamin Bogovič	
Mentor:	doc. dr. Andrej Kryžanowski	
Somentor:	doc. dr. Simon Schnabl	
Načrt:	Diagram območja delovanja StrafloMatrix turbine	
Faza:		
Opombe:		
Datum:	Merilo:	Številka priloge:
2. 1. 2013		D

PRILOGA E: PRERAČUN STABILNOSTI PREGRADE

E 1.1 Volumen jezovne zgradbe:

Plošča:



Slika E1: Prečni prerez prelivnega polja

Površina plošče: $18,75 \text{ m}^2$

Volumen plošče (širina 45 m) : 800 m^3

Skupaj 2 plošči : 1600 m^3

Stebri:

Površina stebrov (3 stebri) : $85,5 \text{ m}^2$

Volumen stebrov (3 stebri) : $800,0 \text{ m}^3$

E 1.2 Obtežbe:

Lastna teža

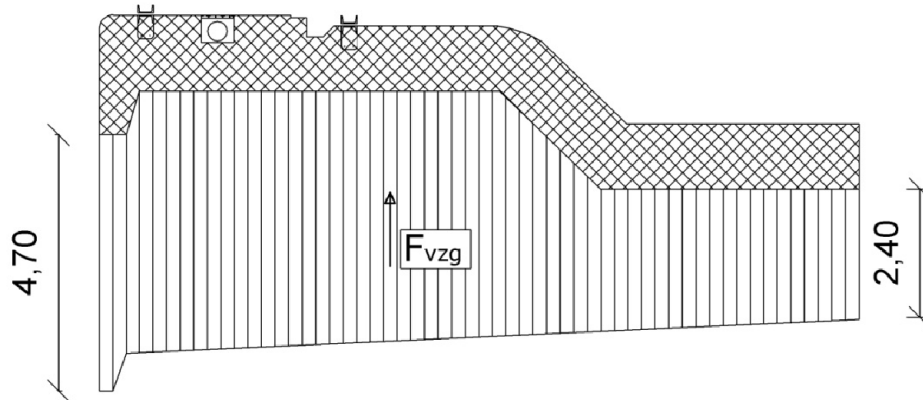
$$\gamma_b = 25 \text{ kN/m}^3$$

$$Fg^{plošči} = 25 \text{ kN/m}^3 * 1600 \text{ m}^3 = 40.000 \text{ kN}$$

$$Fg^{stebri} = 25 \text{ kN/m}^3 * 800,0 \text{ m}^3 = 20.000 \text{ kN}$$

Vzgon:

- predpostavimo učinkovitost tesnilne zavese



Slika E2: Vzgon na prag

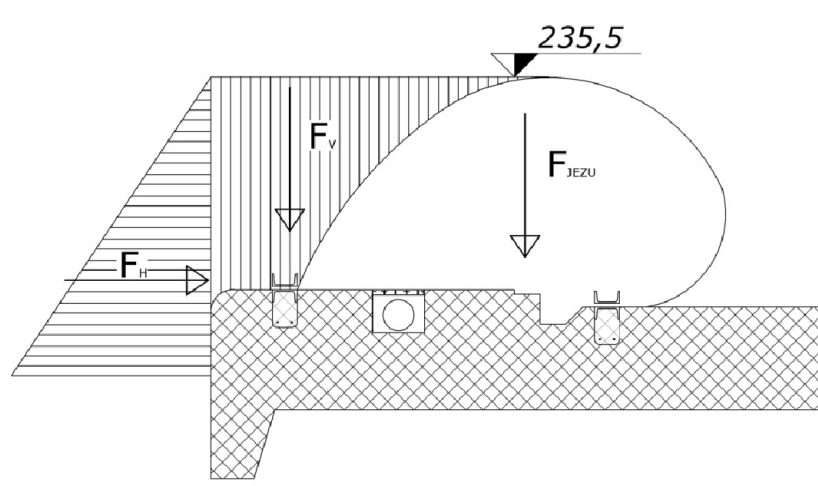
$$\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$$

$$A_{vzg} = 50,7 \text{ m}^2$$

$$L = 101,5 \text{ m}$$

$$F_{vzg} = A_{vzg} * \gamma_w * L = 51.460 \text{ kN}$$

Akumulirana voda zgoraj:



Slika E3: Obtežba akumulirane vode zgoraj

$$\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$$

$$A_H = \frac{3,5^2}{2} = 6,13 \text{ m}^2$$

$$L = 101,5 \text{ m}$$

$$F_H = A_H * \gamma_w * L = 6.220 \text{ kN}$$

$$A_V = 4,75 \text{ m}^2$$

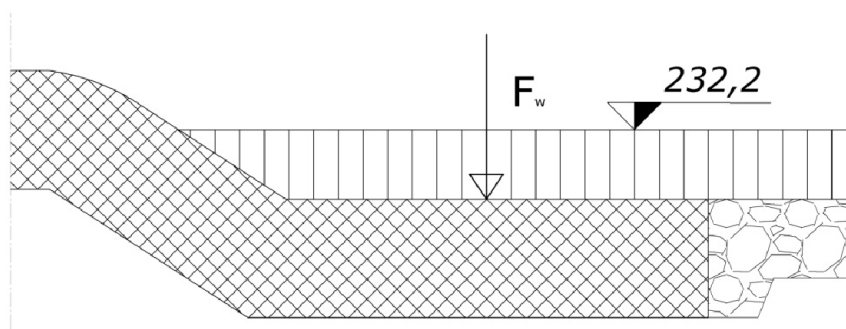
$$A_{JEZU} = 9,5 \text{ m}^2$$

$$L = 90 \text{ m}$$

$$F_V = A_V * \gamma_w * L = 4.275 \text{ kN}$$

$$F_{JEZU} = A_{JEZU} * \gamma_w * L = 8.550 \text{ kN}$$

Akumulirana voda spodaj:



Slika E4: Obtežba akumulirane vode spodaj

$$A_W = 5,6 \text{ m}^2$$

$$L = 90 \text{ m}$$

$$F_W = A_W * \gamma_w * L = 5.000 \text{ kN}$$

Potres:

- vpliv potresa lahko zanemarimo, saj se pojavi izredno veliko dušenje (gumijast jez) in je vpliv veliko manjši kot pri togi konstrukciji.