

# VEČNAMENSKI PROJEKT HIDROELEKTRARN NA SPODNJI SAVI

## A MULTI PURPOSE LOWER SAVA RIVER HYDROPOWER PROJECT

dr. Andrej Širca, univ. dipl. inž. grad.  
Zdenko Josipovič, univ. dipl. inž. grad.  
Krešimir Kvaternik, univ. dipl. inž. grad.  
Izток Močnik, univ. dipl. inž. grad.  
Dušan Somrak, univ. dipl. inž. grad.

IBE, svetovanje, projektiranje in inženiring,  
Hajdrihova 4, 1000 Ljubljana

Strokovni članek

UDK: 627.8(282.243.743)

**Povzetek** | Na odseku reke Save med HE Vrhovo in državno mejo s Hrvaško od leta 2002 potekata gradnja in načrtovanje verige petih hidroelektrarn na lokacijah Boštanj, Blanca, Krško, Brežice in Mokrice. Prikazan je večnamenski vidik trenutno največjega slovenskega energetskega projekta, ki poleg izkoriščanja hidroenergetskega potenciala rešuje tudi nekatere infrastrukturne probleme. Z vidika gradbenega projektanta so navedeni nekateri značilni konstrukcijski in izvedbeni problemi posameznih stopenj verige. Prikazani so tudi tisti okoljski vidiki gradnje, ki so bili najzanimivejši za širšo lokalno javnost.

**Summary** | On the Sava river section between Vrhovo HPP and the state border with Croatia, a chain of hydropower plants is under construction and partly in design at locations of Boštanj, Blanca, Krško, Brežice and Mokrice. A multi-purpose character of the project which provides power utilisation of the river Sava and solution to some infrastructure problems is demonstrated. Some characteristic design and construction problems are described for individual stages of the chain from the viewpoint of the civil works designer. The paper finally addresses those environmental aspects of the construction which have raised most interest among the local population.

### 1 • UVOD

Slovenija se od osamosvojitve in odcepa od relativno velikega elektroenergetskega (EE) sistema nekdanje Jugoslavije srečuje z rastočim primanjkljajem v EE-bilanci. Kljub relativno ugodni strukturi proizvodnje s približno tretjinskimi deleži jedrske, vodne in klasične termalne proizvodnje elektrike je bila letna rast porabe v zadnjem desetletju med 2 in 3 % letno. Kljub načrtovanim zamenjavam nekaterih objektov, ki se bližajo koncu življenjske dobe (npr. TE Šoštanj, TE Trbovlje), se bo energijski primanjkljaj Slovenije v prihodnosti povečeval, pri tem pa so domači naravni energijski viri omejeni na rjavi premog, lignit in vodno ener-

gijo. Predvsem prva dva vira sta okoljsko nedvomno sporna.

Po drugi strani je reka Sava, ki odvaja vodo s 54 % slovenskega ozemlja, energetske izkoriščena le v višini 13 % tehnično izkoristljivega potenciala, kar je bistveno manj kot npr. slovenski odsek reke Drave (97 %), slovensko povprečje (42 %), manj kot primerljive reke v bližnjih državah (Avstrija 68 %, Italija 67 %) ter tudi manj kot je evropsko povprečje (54 %) (2009 World Atlas and Industry Guide, 2009). Zaradi več kot 2800 GWh/leto tehnično izkoristljivega potenciala je bila energetska izraba reke Sava načrtovana že v času avstro-ogrske

monarhije, izgradnja elektrarn pa je začela z izgradnjo HE Medvode po drugi svetovni vojni (do takrat je bilo zgrajenih že več manjših hidroelektrarn v povodju Save: HE Završnica, HE Sava v Tacnu, HE na Radovni, Tržiški Bistrici, Mošeniku, Sori). Aktualni načrti za izrabo jo delijo na 3 odseke: zgornja Sava s HE Moste, srednja Sava z dvema že izvedenima (HE Mavčiče, HE Medvode) in načrtovanimi 9 stopnjami ter spodnja Sava s 6 stopnjami, od katerih so zgrajene tri (Vrhovo, Boštanj, Blanca). V dolgem razvojnem obdobju projektov so bile v povodju Save iz različnih razlogov opuščene sezonske akumulacije Radovljica, Radovna in Planina. Desetletja dolga zgodovina načrtovanja je dobila epilog najprej s podelitvijo koncesije Savskim elektrarnam Ljubljana (SEL), nato pa s podpisom konce-

sijske pogodbe o energetskem izkoriščanju spodnje Save, ki sta jo leta 2002 podpisala država kot koncesionar in Holding slovenske elektrarne (HSE) kot koncedent, s podpismi pa potrdili tudi župani obsavskih občin. V letu 2008 je bila koncesija z aneksom h koncesijski pogodbi prenesena na sedanjega nosilca Hidroelektrarne na spodnji Savi (HESS). V skladu s sodobnimi načeli razvoja hidroenergetskih objektov ((IEA, 2000), (IHA, 2003)) predvideva koncesijska pogodba poleg dveh osnovnih namenov izkoriščanja energije in reševanja poplavne varnosti obsavskega prostora še vodnogospodarsko urejanje Save in pritokov, izboljšanje kvalitete Save, izboljšanje cestnega omrežja ter ustvarjanje pogojev za razvoj namakalnih projektov, turizma in rekreacije.

Osnovna koncesijska pogodba je predvidevala izgradnjo petih stopenj spodnje Save (poleg že zgrajene HE Vrhovo) med letoma 2000 in 2018, pri čemer bi se posamezna HE gradila 4 leta, zamik začetka gradnje stopenj, ki bi tekla v smeri vodnega toka, pa bi bil 3 leta. Po podrobnejših tehničnih obdelavah je bila gradnja HE Krško podaljšana na 5 let, koncesionar pa se

je zaradi uspešnega dotedanega poteka gradnje ter ugodnih razmer na energetskih trgih odločil za pospešitev gradnje stopenj HE Brežice in HE Mokrice (preglednica 1). Predvsem zaradi lokacijskih težav obeh zadnjih stopenj ta terminski načrt verjetno ne bo izpolnjen, vendar bo čas izgradnje celotne verige še vedno bistveno krajši od prvotno predvidenih 18 let.

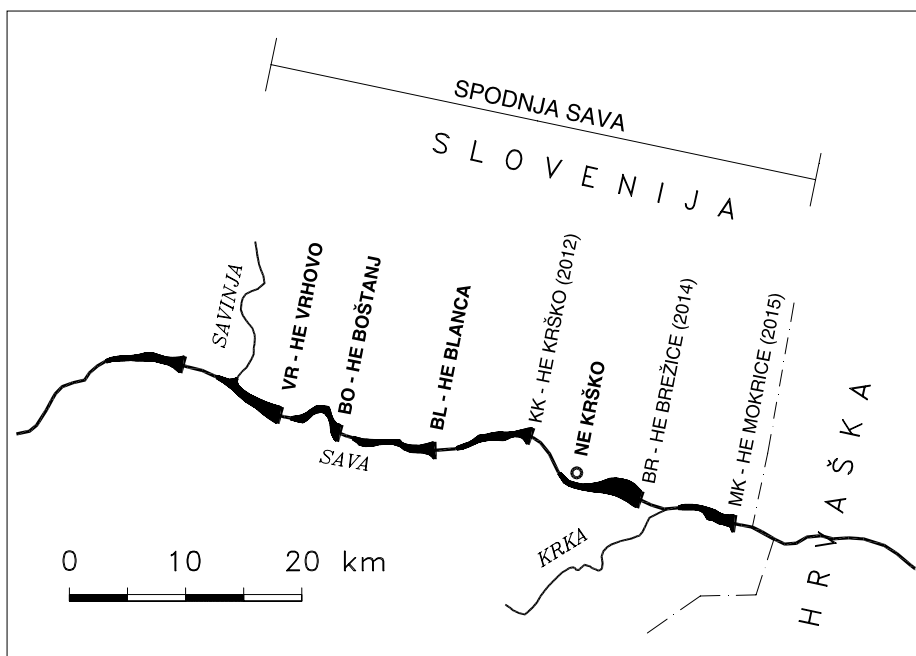
Hidroelektrarna	Boštanj	Blanca	Krško	Brežice	Mokrice
Kratka oznaka	BO	BL	KK	BR	MK
Začetek gradnje (lokacijsko dovoljenje)	2002	2005	2007	2010	2011
Začetek obratovanja (zaključek gradnje)	2006	2009	2012	2014	2015

Preglednica 1 • Aktualni terminski načrt gradnje verige HE na spodnji Savi

## 2 • SPLOŠNI PODATKI – HIDROENERGETIKA

Verigo HE na spodnji Savi sestavlja 6 stopenj (slika 1 in preglednica 2): Vrhovo (kratka oznaka VR, zaključena l. 1993 in obratuje z uporabnim dovoljenjem od l. 1997), Boštanj (BO, zaključena l. 2006 in še v poskusnem obratovanju), Blanca (BL, tehnično zaključena v letu 2009 in v poskusnem obratovanju), Krško (KK, začetek gradnje 2007, načrtovan zaključek gradnje l. 2012), Brežice (BR, predviden zaključek gradnje l. 2014) in Mokrice (MK, predviden zaključek l. 2015).

Dolvodno od sotočja s Savinjo je savska dolina do Krškega široka do največ 1,5 km, pri čemer se na obeh bregovih izmenjujejo urbanizirana in kmetijsko intenzivno obdelana območja. Večji naselja na tem odseku sta Radeče (ob bazenu Vrhovo) in Sevnica (ob bazenu Blanca). Dolvodno od Krškega se dolina razširi v aluvialno Krško-Brežiško polje, ki se s Čateškim in Dobovškim poljem nadaljuje proti Hrvaški ter predstavlja obronke Panonske nižine. Najpomembnejša obrečna naselja na tem odseku so Krško, Brežice s Čatežem ter Krška vas. Pri Brežicah dobi Sava pomemben desni pritok – Krko, in na mejnem odseku s Hrvaško še levi pritok – Sotla. Slovensko-hrvaška meja poteka v dolžini 3,6 km po sredini savske struge, levi breg je hrvaški, desni pa slovenski. Za izrabo je po koncesijski pogodbi predvidenih 58 m padca, kar predstavlja razliko med koto zajezitve HE Vrhovo (191 m n. m.) in koto zajezitve predvidene HE Podšused na Hrvaškem (133 m n. m.).



Slika 1 • Položaj objektov HE na spodnji Savi s predvidenimi leti zaključka gradnje

Sava je relativno hudourniška reka z razponom pretokov na odseku spodnje Save od 50 m<sup>3</sup>/s za nizke vode, do 250 m<sup>3</sup>/s za srednje vode in tudi do 3500 ali 4000 m<sup>3</sup>/s za visoke pretoke Q<sub>100</sub>. Velik del hudourniškega značaja dolguje Sava pritoku Savinji, ki ob visokih vodah prinese 1/3 pretoka, kar se je boleče potrdilo ob velikih poplavah leta 1990

in leta 1998. V letu 2002 je bila izdelana hidrološka študija za odsek spodnje Save (Inštitut za vode, 2002), katere rezultati so povzeti v preglednici 2. Študija je trenutno v reviziji zaradi ugotovljenih nepravilnih meritev v času poplave leta 1990 in posledičnih napačnih interpretacij pretokov ((IBE, 2006a), (FGG-KMTek, 2007)).

Hidroelektrarna:		VR	BO	BL	KK	BR	MK
Pretok Q (m <sup>3</sup> /s)	Najnižji izmerjeni	39,7	40	41,2	41,7	41,8	51,2
	Srednji	218,6	220,9	227,8	230,4	231,2	288,9
	Najvišji izmerjeni	2991	3001	3037	3050	3055	3276
	Q <sub>100</sub>	3200	3210	3270	3290	3290	3610
Konstrukcijska višina pregrade (m)		25,65	26,85	31,35	31,35	31,1	27,4
Število prelivnih polj		5	5	5	5	4	5
Tip turbine		cevne	cevne	Kaplan	Kaplan	Kaplan	cevne
Število agregatov		3	3	3	3	3	2
Bruto hidravlični padec (m)		8,1	7,6	9,19	9,23	10,95	7,8
Inštalirana moč (MW)		34	32	40	40	44	24
Letna proizvodnja (GWh)		126	115	142	151	162	132
Prostornina bazena (1000 m <sup>3</sup> )		8 650	8 131	9 950	6 309	18 432	6 754
Koristni volumen bazena (1000 m <sup>3</sup> )		1 350	1 167	1 300	1 178	3 400	2 640
Zemeljska dela v bazenu (1000 m <sup>3</sup> )		n.a.	530	735	660	1 812	510
Dolžina nasipa – levi breg (m)		250	1000	2000	0	9 100	6 500
Dolžina nasipa – desni breg (m)		1000	350	0	0	8 850	4 600
Število levih pritokov Save		6	6	9	13	3	1
Število desnih pritokov Save		4	4	10	10	2	12

Preglednica 2 • Karakteristični podatki verige HE na spodnji Savi

Tehnično so prve tri stopnje že izvedene, za HE Krško je praktično zaključena projektna faza PZI, zgrajenega je ca. 25 % objekta. Za stopnji HE Brežice in HE Mokrice sta v pripravi idejna projekta, ki bosta zaključena predvidoma v letu 2010.

Vse stopnje bodo rečne hidroelektrarne pretočnega tipa z dnevno izravnavo pretokov. Akumulacija vode se zagotavlja z nasipi različnih dolžin na obeh bregovih Save, ki se prilagajajo poteku terena. Prelivi imajo od 4 do 6 prelivnih polj (tipično 5), v strojnici so po 3 agregati (tipičen prerez na sliki 4). Pregrade so zgrajene na različnih, običajno slojevitih temeljnih podlagah, ki vključujejo skrilavec, peščenjak, lapor, laporni apnenec,

kredni fliš, dolomit, meljevec in laporovec, odvisno od lokacije (Geološki zavod Ljubljana, 1985). Tesnitev pregradnih profilov je tipično zagotovljena le s kontaktnim vbrizgavanjem. Podobne matične podlage se nahajajo tudi pod nasipi, ki pa so temeljeni na prekrivnih aluvialnih slojih. Nasipi so zemeljski, izvedeni iz lokalnega materiala ter na sredini tesnjeni (tipično po tehnologiji jet-grouting). Tesnitev sega do manj prepustne terciarne hribinske podlage. Globoko savsko prelomno območje predstavlja potencialni stik med Dinaridi na jugu in predalpskim svetom na severu, zato so pri zasnovi verige HE upoštevane razmeroma visoke potresne obremenitve. Merodajni horizontalni potresni pospešek se od Vrhovega do

Brežic postopoma zvišuje od 0,135 g do 0,24 g površinskega pospeška ter znova nekoliko upade pri HE Mokrice, kjer znaša 0,19 g (IZIIS, 1981, 1982, 1985a, 1985b).

HE Vrhovo je bila zgrajena v gradbeni jami izven obstoječega korita in je bila pred visokimi vodami Save zaščitena s tesnjenim nasipom s tankostensko diafragmo. HE Boštanj in HE Blanca sta bili zgrajeni vsaka v eni gradbeni jami, ki je deloma ovirala tok Save, in sta bili pred visokimi vodami Save (Q<sub>20</sub>) zaščiteni na gorvodni in dolvodni strani s tesnjenimi zemeljskimi nasipi, na rečni strani pa z betonskim zidom debeline 6 m, izvedenim kot zaporedje vodnjakov in vmesnih polnilnih elementov. Zadnji višinski metri zaščite so bili izvedeni s konzolnimi zidovi, po potrebi sidranimi skozi masivni del zaščitnega zidu v matično hribino. HE Krško se zaradi lege v ozkem delu savske doline gradi v dveh gradbenih jamah, kar je podrobneje opisano v nadaljevanju. HE Brežice in HE Mokrice se bosta zaradi lege na aluvialnih ravninah gradili z uporabo tesnjenih zaščitnih nasipov po celotnem obodu gradbenih jam, reka Sava bo v času gradnje preusmerjena z obtočnima kanaloma.

Inštalirani pretok verige znaša 500 m<sup>3</sup>/s. Med letoma 2009 in 2012 bo veriga obratovala s HE Vrhovo kot čelnim bazenom in HE Blanca kot izravnalnim bazenom. S podaljševanjem verige bo vsakokratni najnižji bazen prevzemal izravnalno vlogo, notranji bazeni pa bodo obratovali z dnevno izravnavo z najnižjim pretokom 100 m<sup>3</sup>/s, potrebnim za hlajenje NE Krško (pogoj velja pri naravnih pretokih Save nad 100 m<sup>3</sup>/s, pri nižjih pretokih pa je treba zagotavljati naravni pretok Save v profilu NEK). Zaradi ekoloških in varnostnih zahtev bodo bazeni obratovali z največjo denivelacijo 1 m (izjema je predvidena za bazen Brežice – 1,1 m, in za bazen Mokrice – 1,3 m), največja dopustna hitrost spremembe bo 1 m/h. Pred zaključkom gradnje verige so zahteve dolvodno od zadnje zgrajene HE še strožje. Po zaključeni gradnji vseh stopenj bo bazen Mokrice izravnal pretok na hrvaški meji na konstanten naravni odtok. Po izgradnji verige HE na srednji Savi bo izravnalno vlogo prevzel tudi predvidoma precej večji bazen Brežice.

### 3 • SPLOŠNI PODATKI – INFRASTRUKTURA

Koncesijska pogodba vključuje potrebne ureditve vodne infrastrukture (urejanje izlivnih delov pritokov pod vplivom zajezitve in zaščita

brežin Save pred erozijo), ostale državne infrastrukture (mreža državnih cest in železnica, visokonapetostni in sredjenapetostni daljnovo-

vodi) ter lokalne infrastrukture (oskrba z vodo, kanalizacijska omrežja, telefonska in druga kabelska omrežja, lokalni plinovodi, okoljske in rekreacijske ureditve itd.). S tehnološkega in okoljskega vidika so zelo pomemben element izgradnje verige HE novi odseki visokonapetostnih 110 kV daljnovodov, ki so lokalno iz-

vedeni kot vkopani kablovodi. Nekatere druge ureditve, npr. čistilne naprave za odpadno vodo, se uvrščajo bodisi v državno bodisi v lokalno infrastrukturo, kar se določi na podlagi dimenzij in pomena. Delitev stroškov med koncesionarjem in drugimi investitorji (ministrstva, občine, upravljavci infrastrukture) se za vsako HE določi s posebnim elaboratom (za HE Blanca: Širca in Barbič, 2006).

Na odseku spodnje Save do HE Krško bo velik del brežin zaščiten s skalometno oblogo debeline 30 do 50 cm. Razlog za to so železniška proga, lokalna cesta na levem bregu in glavna cesta Celje–Krško na desnem bregu, ki se izmenično približujejo bregovom Save. Na posameznih, manj izpostavljenih odsekih savske brežine na območju bazenov Blanca in Krško je v skladu z naravovarstvenimi pogoji predvidena ohranitev brežine v naravnem stanju. Dolvodno od vseh HE, na tako imenovanem območju *spodnje vode*, je zaradi povečane erozijske moči reke na obeh bregovih potrebna težka skalometna zaščita, katere dolžina in debelina sta odvisni od lokalnih hidravličnih pogojev. Na odseku dolvodno od Krškega se ceste in železnica oddaljijo od bazena, zato so v bazenih Brežice in Mokrice predvideni odseki s skalometno zaščito brežin struge Save krajši.

Bazeni prvih štirih elektrarn se skoraj v celoti nahajajo v naravni strugi Save. Pri teh bazenih se poplavna zaščita zagotavlja z energetskimi nasipi, ki so hkrati tudi visokovodni. Bazena zadnjih dveh elektrarn Brežice in Mokrice v svojem večjem delu segata izven struge Save. Pri obeh bazenih so za nasipi obsežne poplavne površine na večinoma kmetijskih zemljiščih, ki se jih ne sme opustiti. Ukinitvev teh poplavnih površin bi namreč pomenila pospešitev in povišanje konice poplavnega vala in hkrati dvignila gladine visokih pretokov ob obstoječi NE Krško. Zaradi tega je v bazenih Brežice in Mokrice predvidena izvedba bočnih prelivov, ki bodo prevajali vode višje od ca.  $Q_{20}$ , nižji pretoki pa bodo ostali znotraj nasipov. Ob izgradnji obeh elektrarn bodo izvedeni tudi ukrepi za zaščito naselij pred poplavami.

Izgradnja bazenov verige HE vpliva na daljše odseke cestnega omrežja na obeh bregovih Save, predvsem v zgornjem delu verige do HE Krško. Koncesionarjeva pogodbeni obveza je tudi izgradnja dveh cestnih mostov in enega mostu za pešce. S tem namenom je že izveden most čez pregrado Blanca, še eden je predviden na območju bazena Mokrice. Brv za pešce je zgrajena pri kraju Orehovo na območju bazena Boštanj. Ideja

za že zgrajeni novi (severni) most obvoznice Krško je izšla iz potrebe po začasni premostitvi Save v času gradnje HE Krško in se je razvila v realen projekt v času lokacijskega postopka za HE Krško. Ta objekt je bil eden od ključnih elementov, ki so zagotovili podporo lokalnega prebivalstva projektu HE Krško.

Infrastrukturni in sočasno okoljski problem verige HE je tudi obstoječa NE Krško na bregu bazena Brežice, ki ima v Savi svojo pregrado za zagotavljanje hladilne vode. Novi bazen in posredno tudi drugi bazeni gorvodno bodo vplivali na obratovanje NE Krško z drugačnimi nivoji vode na vtoku in iztoku iz hladilnega sistema, z dinamiko koničnega obratovanja verige, s toplotnimi vplivi ter z izgubo dela samostojnosti pri obratovanju z jezom v Savi. Zaradi lege NE Krško v zgornjem delu bazena Brežice, kjer bodo vplivi jezov Brežice ob visokih vodah praktično ničelni, bo poplavna varnost NE Krško ostala nespremenjena. Posebna pozornost se pri načrtovanju bazena Brežice posveča ureditvam za prevajanje visokovodnega vala (bočni preliv, protierozijske zaščite), ki ne smejo poslabšati poplavnih razmer tako na območju lokacije NE Krško kot tudi na celotnem poplavnem območju zunaj nasipov bazena.

## 4 • OPIS POSAMEZNIH STOPENJ VERIGE HE

### 4.1 HE VRHOVO

Gradnja HE Vrhov je bila zaključena leta 1993, potem je gradnja verige HE zastala za več kot 10 let. Pregrada je situirana v km 778 + 027 reke Save in temeljena v glinenem

skrilavcu z lokalnimi plastmi peščenjaka (Elektroprojekt Ljubljana, 1988). Zajezitev Save se pretežno ustvarja v strugi, razen v skrajnem dolvodnem delu bazena, kjer je poplavljen nižja terasa Vrhovskega polja.

Zajezitev vpliva na nižje ležeča območja mesta Radeče in na gladino izlivnega dela reke Sopot. Ta je ločena od zaledja z diafragmo, ki sega do neprepustne podlage, z obrežnim zidom (slika 2) ter z drenažo. Drenažna voda se zbira v črpališču in vrača v reko. Ob izvedbi navedenih zaščit sta bila potrebna rekonstrukcija dela kanalizacijskega omrežja Radeč ter rušenje nekaj



Slika 2 • Brežine regulirane Sopot v Radečah



Slika 3 • HE Boštanj iz ptičje perspektive



starejših objektov. Poleg manjšega posega na sicer redno poplavljeni lokalni cesti je bil edini večji infrastrukturni problem glavna železniška proga Ljubljana–Zagreb. Na tej so bili potrebni posegi na nekaj prepustih, zaščita železniškega nasipa pred izpiranjem finih delcev, manjši posegi na podpornih zidovih ter na mostnih stebrih v Zidanem Mostu.

#### 4.2 HE BOŠTANJ

HE Boštanj se nahaja v km 769 + 677 reke Save (slika 3) in je temeljena na dolomitnem apnencu in razpokanem dolomitu ter na enem tektonskem bloku (Elektroprojekt Ljubljana, 1988).

Glavni posegi v infrastrukturo vzdolž bazena Boštanj so bili potrebni na progi Ljubljana–Zagreb, in sicer na več odsekih glavne ceste in lokalnih cest ter na manjših bivalnih in drugih urbaniziranih površinah. Posegi na železnici se delijo na tri značilna območja. Najbolj dolvodnih 2800 m proge leži za energetskim nasipom, zato sta bila potrebna le gradnja drenažnega kanala in njegov izpus v spodnjo vodo. Naslednjih 1300 m železniškega nasipa je neposredno izpostavljenih nihanju gladine v bazenu, zato je bila potrebna izvedba zaščite pred izpiranjem ter obnova prepustov in mostov. Na skrajno gorvodnih 1600 m so se le rekonstruirali prepusti in v njihovi bližini zaščitile brežine Save. Na cestnem omrežju je bila potrebna gradnja 1100 m nove lokalne ceste in rekonstrukcija 2200 m glavne ceste s pripadajočimi prepusti, mostovi, podpornimi in zaščitnimi zidovi. Do glavnega vpliva na poselitev je prišlo pri vasi Kompolje, kjer so se rekonstruirali kanalizacijski sistem in vodna črpališča, celotno naselje pa je obdano z injeckijsko zaveso, znotraj katere se varni nivo podtalnice vzdržuje z drenažnim sistemom, katerega sestavni del je tudi črpališče za prečrpavanje vode v Savo.

#### 4.3 HE BLANCA

Pregradni profil HE Blanca se nahaja v km 760 + 627 reke Save, nekaj 100 m gorvodno od vasi Blanca na levem bregu. Temeljna podlaga je sestavljena iz plasti krednega fliša. Izmenjujejo se sloji lapornih apnencev, apnenca z roženci, apnenčastega peščenjaka, laporja in lapornatega skrilavca, kar je predstavljalo dokaj zahtevne pogoje za izvedbo in temeljenje objekta (IBE, 2005).

Značilnost HE Blanca je most za lokalni promet, ki prečka Savo na dolvodni strani pregrade (slika 4) in je temeljen na desni dolvodni krilni zid, na stebre med agregati ter na stebre prelivnih polj.

Bazen Blanca sega na gorvodni strani do HE Boštanj. Reka na tem odseku teče med razmeroma gosto poseljenimi bregovi med Sevnico in Blanco. Levi breg bazena gorvodno od HE Blanca predstavlja 2000 m dolg klasičen zemeljski nasip na območju Dolnjega Brezovškega polja ter približno 1150 m nadvišanega kmetijskega zemljišča na območju Kračnice, katerih krona je v obeh primerih na koti 175,70 m n. m. Nasip je tesnjen do neprepustne podlage, za območje Kračnice pa je bilo prvotno predvidena netesnjena izvedba, vendar se je zaradi zaščite železnice naknadno podaljšala zavesa na območju celotnega Gornjega Brezovškega polja.

Na desnem bregu je na bregovih bazena več nadvišanih kmetijskih območij, ki so izvedena po enakih principih kot že omenjeno odlagališče Kračnica: obveza po ohranjanju velikosti in kakovosti kmetijskih površin, čim krajše obdobje izvedbe (zaradi minimiziranja izpada kmetijske proizvodnje) ter čim manjša oddaljenost od virov deponijskega materiala. Dolvodno od HE Blanca je izvedenih 2500 m poglobljanja struge, ki zagotavlja dodaten energijski padec (brez poglobljanja bi bil izgubljen zaradi opustitve vmesne stop-

nje verige HE Brestanica) ter hkrati povečuje poplavno varnost vasi Blanca.

#### 4.4 HE KRŠKO

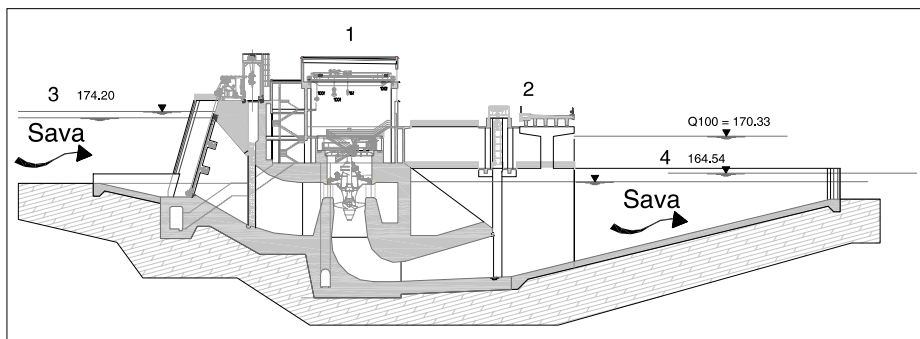
Pregradni profil HE Krško je lociran v km 751 + 575 reke Save, v bližini zaselka Sotelsko na levem bregu (IBE, 2006b). Temeljna hribina je zgodnje triasni dolomit, prekrit z rečnimi sedimenti kvartarne starosti. Problematika plitvih lokalnih prelomov z zdrobljenimi in pretrtimi conami v generalno masivni hribini se v času gradnje rešuje na različne načine, ki bodo prikazani v posebnem prispevku. V zvezi z geologijo temeljnih tal velja omeniti še pričakovano zahtevno poglobljanje dolvodne struge vzdolž mesta Krško, ki se bo izvajalo v dolomitni hribini od 3. do 5. kategorije izkopa.

Zaradi unifikacije strojnic HE Blanca in HE Krško sta objekta poenotena vizualno in v bistvenih dimenzijah. Edina razlika je višina strojnične hale, ki je pri HE Krško višja za 1,2 m. Objekta sta unificirana tudi z vidika hidromehanske opreme prelivnih polj in razen nekaterih manjših izjem tudi z gradbenega vidika izvedbe prelivnih polj.

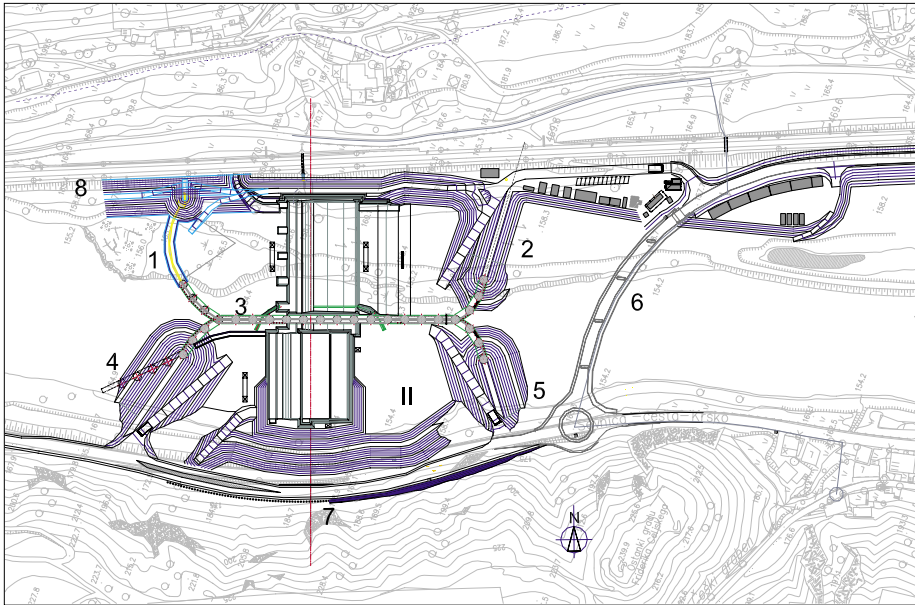
Gradnja HE Krško poteka v dveh gradbenih jamah (slika 5), kar je potrebno zaradi ozkega pregradnega dolinskega profila. V prvi gradbeni jami so bila med oktobrom 2007 in junijem 2009 zgrajena 4 prelivna polja in pripadajoče ureditve na levem bregu (slika 6). Dela v drugi gradbeni jami so se začela v juniju 2009 in bodo potekala do konca gradnje v letu 2012. V tej jami bo zgrajeno 5. prelivno polje in strojnica s pripadajočimi ureditvami na desnem bregu. Zaradi dveh faz gradnje je čas izvedbe HE Krško v primerjavi z drugimi stopnjami podaljšan za več kot eno leto.

Najopaznejši ukrep na območju bazena Krško bo sanacija kmetijskih površin zaradi dviga gladine Save na območju Pijavškega polja, ki je uglašen tudi z delnim povečevanjem poplavne varnosti območja. Oba ukrepa sta bila usklajena tudi z deli v spodnji strugi (poglobljanje, lokalno širjenje), od koder se predvideva transport dela potrebnih količin materiala za nadvišanje polja. Četrta učinek razmeroma obsežnih zemeljskih del v strugi Save bo povečana poplavna varnost Krškega, kjer bo gladina pri  $Q_{100}$  znižana za ca. 50 cm.

V samem bazenu Krško je bil predviden največji poseg v strugo (oz. širitev) na desnem bregu Pijavškega polja, medtem ko naj bi levi breg zaradi okoljevarstvenih zahtev ostal v čim naravnejšem stanju. Zaradi delnih sprememb projektnih izhodišč, predvsem želje in potrebe



Slika 4 • Vzdolžni prezek preko strojnice HE Blanca; 1 – strojnica; 2 – cestni most; 3 – koda bazena (zaježive); 4 – koda spodnje vode (bazen Krško)



Slika 5 • Situacija gradbenih jam I in II za HE Krško (faza PGD); I, II – prva in druga faza gradnje; 1 – gorvodna začasna ločna pregrada; 2, 5 – dolvodna zaščitna pregrada; 3 – vzdolžni zaščitni vodnjaški zid; 4 – gorvodna zaščitna pregrada; 6 – novi most obvoznice Krško; 7 – deviacija glavne ceste; 8 – železnica

po kontinuirani večnamenski levoobrežni poti od HE Krško mimo Brestanice do Penka (Dolenji Leskovec), so v aktualni fazi PZI za bazen predvideni tudi nekoliko večji posegi v levi breg ter zaščita železnice.

#### 4.5 HE BREŽICE

Predvidena lokacija HE Brežice je v km 738 + 492 reke Save, približno 1100 m gorvodno

od sotočja Save in Krke (IBE, 2007a). Tako strojnica (edina v verigi na levem bregu Save) kot prelivna polja naj bi bili temeljeni na plasteh laporovca, meljevca, peščenega laporja in peščenjaka, ki na tem območju tvorijo terciarno osnovo (Geološki zavod Ljubljana, 1985). Nad to osnovo so plasti gramoza ter deloma gramoza s peskom in meljem, površinske sloje pa tvorijo plasti melja, peska

in gline. Strojnica s tremi turbinami Kaplan bo podobnih dimenzij kot v Krškem in Blanci, medtem ko bo število prelivnih polj morda drugačno.

Značilnost HE Brežice so razmeroma dolgi nasipi na obeh bregovih, ki bodo temeljeni na podobni podlagi, kot je opisana pri strojnici, v tem primeru seveda na površinskih plasteh, ki jih sestavljajo kvartarne naplavine. Tesnitev nasipov in podlage je možna na več načinov, kar bo zahtevalo podrobno obravnavo in optimizacijo v času izdelave projektne dokumentacije. Zaradi ohranjanja aktivne vloge poplavnih površin v zaledju bodo nasipi predvidoma na dveh mestih (na vsakem bregu po eno) prekinjeni z bočnima prelivoma okvirne dolžine 140 m. Po prvotnih izračunih je bilo v času  $Q_{100}$  predvideno prevajanje ca.  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  preko zalednih površin za nasipi, vendar aktualne obdelave s tako imenovanimi *hibridnimi modeli* kažejo na tudi precej večje vrednosti, ki pa so še predmet optimizacije tehničnih rešitev. Hibridni modeli so kombinacija fizičnih in matematičnih hidravličnih modelov, ki bodo opisali območje poplavnih površin v zaledju HE Brežice in HE Mokrice, najprej v sedanjem in nato še v načrtovanem prihodnjem stanju. Ta način hidravličnega modeliranja se izvaja prvič v Sloveniji.

HE Brežice je načrtovana v okolju z intenzivno kmetijsko dejavnostjo, pa tudi z naravovarstveno pomembnimi vsebinami. Pri umeščanju bazena v prostor se zato posveča veliko pozornosti, da se vplivi na



Slika 6 • Zaključena dela v I. gradbeni jami HE Krško; zgrajena so 4 prelivna polja in križna zidova na levem bregu Save; stanje na 3. julij 2009



Slika 7 • Druga gradbena jama HE Krško, izvedba izkopov za strojnico; v ozadju levo – betoniranje prvih temeljnih blokov in izvedba drenažnih betonov, desno – zaščitni vodnjaški zid z ureditvijo odvodnjavanja, v ospredju levo – drenažno črpališče; stanje na 9. december 2009



oba vidika uravnatežijo, kar je zaradi velikosti bazena (bazena HE Brežice in HE Mokrice imata vlogo izravnalnega bazena za celotno prihodnjo verigo od HE Mavčiče) zelo zahtevno delo. Zaradi posegov na nekaterih naravovarstveno pomembnih površinah je predvidena izvedba obsežnih nadomestnih habitatov (mokrišča, vodne površine, gozdovi ...). Tudi bazen bo vseboval ureditve za razvoj različnih habitatov (plitvine, otok, zasaditve ...).

Na območju prihodnjega bazena Brežice je načrtovanih več rekreacijskih površin in turističnih objektov, tudi sama vodna površina bazena bo predstavljala velik rekreacijski, športni in turistični potencial.

#### 4.6 HE MOKRICE

HE Mokrice je zadnja stopnja v verigi in se nahaja na mejnem odseku Save (IBE, 2007b). Tu na dolžini 3,6 km poteka meja med Slovenijo in Hrvaško po sredini reke. Na osnovi enakovredne delitve potenciala mejnega odseka so bile študirane različne variante:

- 1) HE Mokrice 1 s skrajno gorvodno lego, v celoti na slovenskem ozemlju (ca. 400 m gorvodno od začetka mejnega odseka);
- 2) HE Mokrice 2 z lego približno na polovici mejnega odseka;
- 3) HE Mokrice 3 med lokacijama 1 in 2 (tik nad izlivom Sotle na levem bregu);
- 4) HE Mokrice 4 z jezom v profilu HE Mokrice 1, ca. 2,5 km dolgim dovodnim kanalom ter strojnico na desnem bregu

Tako na podlagi tehnično-ekonomske analize kot zaradi praktičnih lokacijskih problemov obmejnega prostora je v sedanji fazi razvoja projekta izbrana varianta 1. Zaradi možne zahteve po polni izravnavi pretoka (naravnem odtoku) v mejnem profilu je bila študirana tudi varianta z inštaliranim pretokom 350 m<sup>3</sup>/s, vendar je za nadaljnje obdelave privzeta koncesijsko določena varianta 500 m<sup>3</sup>/s, ki edina zagotavlja polno izkoriščenost potenciala v vseh pogojih.

Jezovna zgradba in strojnica sta podobni gorvodnim objektom, vendar s specifičnimi

prilagoditvami morfološkim, geološkim in hidrološkim pogojem lokacije. Temeljena bo na slojih glinenca, laporja, peščenjaka, peščenega laporja in laporovca, ki so prekrti z nekaj metri kvarternih (deloma peščenih) prodov in s površinskim slojem peščenih meljev in glin. Izdelana je bila tudi študija izvedljivosti podaljšanja plovnosti Save od sedanje končne točke v Sisku do Slovenije, in sicer z variantama pristanišč dolvodno od pregrade Mokrice v bazenu Mokrice in celo v bazenu Brežice. Tovrstni razvojni načrti za novi cestno-železniško-rečni logistični center ob državni meji dajejo projektu spodnjesavske verige tudi povsem nov, večnamenski značaj. Dolvodno od HE Mokrice je predvideno poglobljanje struge v dolžini 2,5 km, s katerim se kompenzirajo izgube zaradi prve dolvodne zaježitve na Hrvaškem – HE Podsused. Po drugi strani je ob bazenu Mokrice – analogno kot ob bazenu Brežice – predvidena ohranitev zalednih poplavnih površin Dobovškega polja, katerih naloga je zmanjševanje poplavnih konic.

## 5 • OKOLJSKA PROBLEMATIKA

Na delu verige gorvodno od HE Krško so bila najaktualnejša okoljska vprašanja ohranjanje kmetijskih površin v pogojih dviga gladine Save, ohranjanje ribje populacije in njene migracije ter ohranjanje tipične obrečne krajine. Dolvodno od HE Krško so glavni problemi povezani s premeščanjem plavin in z vplivi bazenov na podtalnico, zelo zahtevno pa je tudi reševanje prevajanja poplavnih valov in s tem povezane varnosti NE Krško (Hudoklin, 2005).

Kmetijske površine najboljše kakovosti pokrivajo velika območja na obeh bregovih Save, zato se je vsak od bazenov obravnaval specifično, pri čemer so bile upoštevane potrebe po dvigu terena, možni namakalni ali drenažni ukrepi ter populacijski in sociološki vplivi morebitnih sprememb lastništva obdelovane zemlje. Določen je bil kriterij dviga terena 1,5 m nad bodočo gladino podtalnice, ki omogoča tudi kasnejši razvoj namakalnih sistemov in predvsem ustreza vsem kulturam. Določena sta bila način izvedbe in struktura prihodnjih kmetijskih površin na dvignjenih tleh, potrebni materiali zanje se zagotavljajo z vzdolžnimi in prečnimi izravnavami mas. Velika pozornost

se posveča gospodinjstvom oz. kmetijam, ki so eksistencialno odvisne od kmetijske proizvodnje. Če je treba, so takšnim kmetijam ponujena tudi nadomestna zemljišča.

Izhajajoč iz kompleksne študije ribje populacije (Zavod za ribištvo, 2004), je bil sprejet sklep o nujni gradnji prehodov za vodne organizme na vseh stopnjah verige. Sočasno so bile dane tudi zahteve po oblikovanju drstišč v nekaterih pritokih, po ohranitvi naravne oblike izlivnih delov nekaterih savskih pritokov ter po ohranitvi daljših odsekov naravnih brežin brez klasične skalometne zaščite. V času nastanka tega članka je bila praktično zaključena gradnja bazena Blanca vključno s preходом za vodne organizme v pretežno sonaravni obliki ter v zadnjih pripravah gradnja bazena Krško. Pri bazenih Vrhovo in Boštanj so bili predvideni in izvedeni drugačni ukrepi za ustvarjanje pogojev za življenje ribje populacije (umetno drstišče pri HE Vrhovo, prehod za vodne organizme na Mirni), ki sta bila zgrajena oz. zasnovana pred odločitvijo o zagotavljanju ribjih migracij s prehodi ob zgradbah jezov.

V izdelavi je revizija študije premeščanja plavin, vendar so nekatera splošna dejstva

znana že vnaprej. Premeščanje rinjenih plavin (prodonosnost) je močno okrnjeno in se bo z izgradnjo verige predvidoma zmanjšalo na minimum oz. za dlje časa prekinilo. Vzrok za to so tako nove pregrade kot tudi vodnogospodarski in drugi ukrepi za zmanjševanje erozije v povodju. Po drugi strani se pričakuje relativno nemoteno premeščanje lebdečih plavin vzdolž bazenov verige ter njihovo usedanje predvsem v zadnjih dveh (plitvejših) bazenih. Za obvladovanje tega usedanja so predvideni različni ukrepi, od (hidravlično) kontroliranega usedanja do čiščenja, pri čemer se lahko odlagališča usedlin formirajo znotraj ali zunaj prihodnjih bazenov.

Deset do petnajst metrov globoki aluvialni vodonosnik Krško-Brežiškega polja na območju prihodnjega bazena HE Brežice predstavlja eno od največjih slovenskih podzemnih zalog vode. Dopolnjuje ga – čeprav ne neposredno povezan – globinski termalni vodonosnik Čateškega polja na območju bazena Mokrice, ki ima v tem trenutku predvsem turistični potencial. Na podlagi več študij vpliva bazenov na podtalnico je izražena zahteva po ločitvi bazenov od vodonosnikov. Takšna rešitev preprečuje izgube iz bazenov, s sistemom drenažnih kanalov obvladuje gladine podtalnic v zaledju ter v določenih razmerah tudi ščiti podtalnico pred onesnaženjem.

## 6 • SKLEP

Projekt verige HE na spodnji Savi je v tem trenutku eden od največjih infrastrukturnih in energetskih projektov v Sloveniji. Sočasno je eden od najboljšejših hidroenergetskih projektov v tem delu Evrope, ki ima realne

možnosti za širitev tako na višjeležeči odsek srednje Save kot tudi navzdol na Hrvaško, kjer se načrtuje podobna veriga dodatnih štirih HE (Podsused, Prečko, Zagreb, Drenje). Optimistična pričakovanja temeljijo na aktual-

nem stanju intenzivnih gradbenih del, ob katerih se pridobivajo izkušnje in priporočila ter šolajo kadri pri vseh udeležencih: investitorjih, inženirjih, izvajalcih in projektantih. Dosedanja izvedba treh večnamenskih objektov vsekakor lahko služi kot uspešen vzorec za podobne projekte doma kot tudi v tujini.

## 7 • ZAHVALA

Avtorji se zahvaljujejo investitorju verige HE na spodnji Savi, družbi Hidroelektrarne na spodnji Savi (HESS) ter JP Infra kot izvajalcu ureditev infrastrukture na območju spodnje Save za dovoljenje za objavo prispevka.

## 8 • LITERATURA

- Barachini, J., Peternel, J., in skupina avtorjev, Ukročena lepota: Sava in njene zgodbe, Monografija, 268 str., Sevnica: Javni zavod za kulturo, šport, turizem in mladinske dejavnosti, 2009.
- ELEKTROPROJEKT LJUBLJANA, Hydro power plants on the Sava and Mura rivers, Feasibility report, Volume 2: Hydro power plants on the Sava river, Technical solution, 1988.
- FGG-KMTek, Recenzija elaboratov o pretočnosti pri visokih vodah Save v povezavi s HE Krško, Recenzija, FGG, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem, 2007.
- GEOLOŠKI ZAVOD LJUBLJANA, Problems of geology and geomechanics in construction of a chain of run-of-river power plants on the Sava river from Zidani most to Mokrice, Study, 1985.
- Hudoklin, J., Prostorski in okoljski vidiki načrtovanja hidroelektrarn, Slovenski vodar, št. 16, 2005.
- IBE, HE Blanca, Idejni projekt, Naročnik HSE, št. projekta IBBL-A200/018A, 2005.
- IBE, HE Krško, Pretočnost Save pri visokih vodah v odseku ureditev HE Krško – opredelitev projektnih hidravličnih osnov za HE Krško, Ekspertiza, št. projekta IBKK-A200/019A, 2006a.
- IBE, HE Krško, Idejni projekt, Naročnik HSE, št. projekta IBKK-A200/019A, 2006b.
- IBE, HE Brežice, Idejne rešitve, Naročnik HSE, št. proj. IBBR- A200/037A, 2007a.
- IBE, HE Mokrice, Idejne rešitve, Naročnik HSE, projekta IBMK-A200/037B, 2007b.
- IEA, Hydropower and the Environment, Present Context and Guidelines for Future Action, IEA Technical Report, Volume I, Summary and Recommendations, International Energy Agency, 2000.
- IHA, Sustainability Guidelines, Draft, International Hydropower Association, 2003.
- INŠTITUT ZA VODE, Hidrološka študija reke Save na odseku HE Boštanj, HE Blanca, HE Krško, HE Brežice, HE Mokrice, Študija, naročnik IBE, 2002.
- IZIIS, Analiza seizmičnega hazarda i projektnih seizmičnih parametrov za HE Vrhovo (izveštaj 81–17), 1981.
- IZIIS, Analiza seizmičnega hazarda i projektnih seizmičnih parametrov za HE Boštanj (izveštaj 81–136), 1982.
- IZIIS, Analiza seizmičnega hazarda i projektnih seizmičnih parametrov za HE Blanca (izveštaj 85–50), 1985a.
- IZIIS, Analiza seizmičnega hazarda i projektnih seizmičnih parametrov za HE Brežice in HE Mokrice (izveštaj 84–124), 1985b.
- ŠIRCA, A., BARBIČ, B., A multipurpose Lower Sava river project in Slovenia: Examples of the Blanca and Krško cascades, Dams and reservoirs, societies and environment in the 21<sup>st</sup> century Proceedings of the International Symposium on Dams in the Societies of the 21<sup>st</sup> century, ICOLD-SPANCOLD, Barcelona (pp 385–392), Taylor & Francis, ISBN 0-415-40423-1, 2006.
- ZAVOD ZA RIBIŠTVO SLOVENIJE, Ihtiološke raziskave reke Save od HE Vrhovo do HE Krško, Študija, naročnik HSE, 2004.
- 2009 World Atlas and Industry Guide, The International Journal on Hydropower & Dams. Aqua ~ Media International, Wallington, Surrey, UK, 2009.