

GRADNJA HE KRŠKO NA SPODNJI SAVI

CONSTRUCTION OF THE KRŠKO HPP ON THE LOWER SAVA RIVER

dr. Andrej Širca, univ. dipl. inž. grad.
Zdenko Josipovič, univ. dipl. inž. grad.
Boris Rodič, univ. dipl. inž. grad.

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

Strokovni članek
UDK 627.8(282.243.743)(497.4)

Povzetek | Na odseku spodnje Save se v letu 2012 zaključuje gradnja 43 MW pretočne hidroelektrarne (HE) Krško. Z 9,3 m hidravličnega padca in 500 m³/s inštaliranega pretoka bodo tri Kaplanove turbine letno proizvajale v povprečju 155 GWh električne energije. Zaradi nedostopnosti levega brega, omejenega prostora za ureditev gradbišča, bližine glavne ceste in železnice ter globokih izkopov v lokalno močno pretrti dolomiti hribini je bila gradnja HE Krško zahtevnejša v primerjavi z drugimi stopnjami na spodnji Savi. Izpeljana je bila fazno v dveh gradbenih jamah. V prvi so bila dela zaključena v letu 2009, v drugi pa v začetku leta 2012. Dodatna problema gradnje sta bili dve veliki poplavi v letih 2009 in 2010. V članku so najprej podani osnovni tehnični podatki elektrarne in gradbišča, nato pa podrobneje opisane faze gradnje in konstrukcijski detajli. Ti vključujejo več začasnih konstrukcij: ločne pregrade, masivni betonski vodnjaki, sidrane brežine in razpore v obliki prednapetih betonskih gred.

Ključne besede: HE Krško, pretočne HE, faze gradnje HE, konstrukcija HE

Summary | The Krško HPP is a 43-MW run-of-the-river type HPP that is terminating on the lower Sava river reach. With a 9.3-m hydraulic head and 500 m³/s installed discharge, three Kaplan type turbines will annually generate 155 GWh of electric energy on an average. Due to the inaccessibility of the left river bank, the limited construction space in the narrow valley, the vicinity of the main road and the railway as well as deep excavations in locally strongly fractured dolomite bedrock, the construction of the Krško HPP was rather complicated as compared to the other stages of the chain. A staged approach with two construction pits was applied, with the first stage completed in 2009 and the second one completed in 2012. Two extreme floods with their consequences also added to the list of problems to be solved during the construction time. First, an overview of the power plant technical data and of the construction site is given in the paper, which is followed by the detailed description of selected construction phases and details. They include several temporary structures including small arch dams, large concrete piles, anchored banks, and temporary concrete girder supports for spillway construction.

Key words: HPP Krško, run-of-the-river type HPP, construction phases, HPP structures

1 • UVOD

V okviru gradnje HE na spodnji Savi, ki je trenutno verjetno največji infrastrukturni projekt v Sloveniji, bo v prvi polovici leta 2012 zaključena gradnja četrte stopnje verige, HE Krško. Pred tem so bile gorvodno že zgrajene

HE Vrhovo (1993, začetek obratovanja, koncesionar Savske elektrarne Ljubljana, SEL), HE Boštanj (2006, Hidroelektrarne na spodnji Savi, HESS) in Blanca (2009, Hidroelektrarne na spodnji Savi, HESS). Gradnja celotne ve-

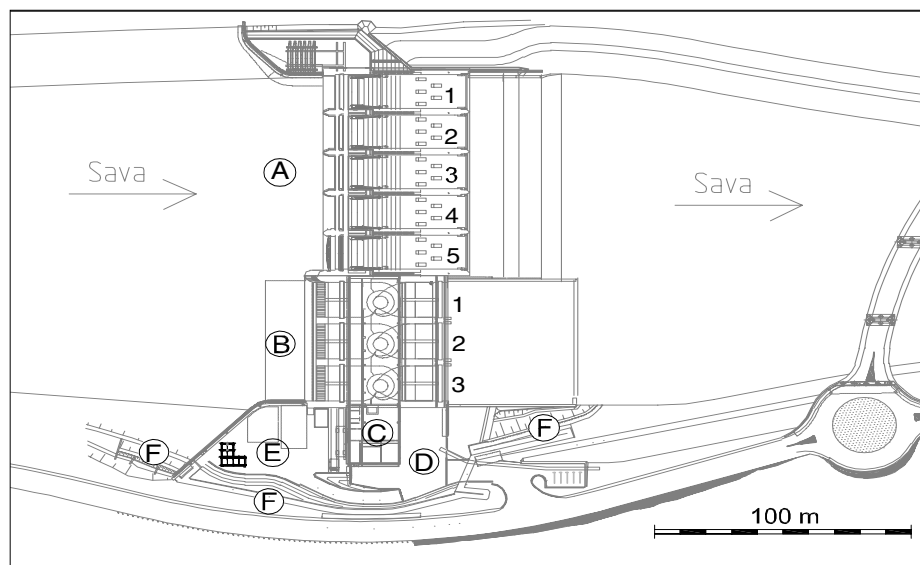
rige je bila že predstavljena (Širca, 2010), ob zaključevanju gradnje pa je priložnost za predstavitev nekaterih vidikov zasnove in izvedbe HE Krško. Predmet prispevka ni sama konstrukcija HE, ki je v osnovnih značilnostih in dimenzijah podobna gorvodno zgrajeni HE Blanca, temveč predvsem organizacija del v dveh gradbenih jamah ter iz tega izhajajoče številne pomožne in začasne konstrukcije.

1 • SPLOŠNI PODATKI HE KRŠKO

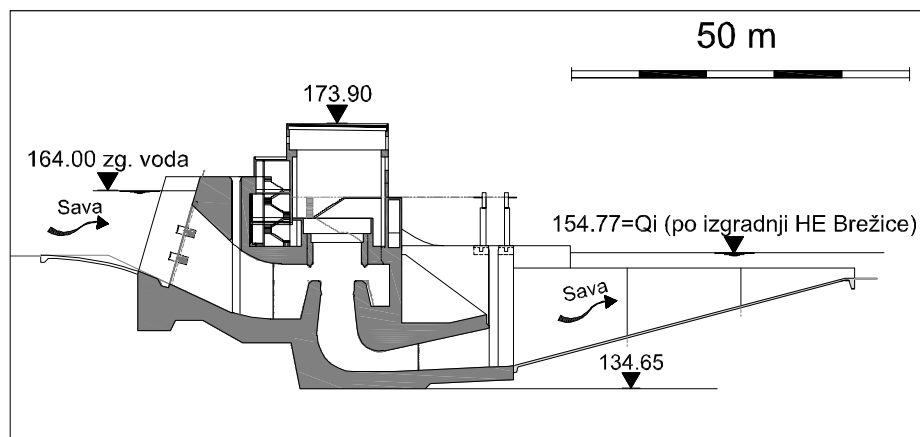
HE Krško je postavljena v savskem km 751 + 575 v bližini vasi Sotelsko na levem bregu oziroma ca. 300 m gorvodno od prvih hiš v Krškem na desnem bregu Save. Struga Save se v profilu pregrade razširi na skoraj 150 m, medtem ko je gorvodno nekoliko ožja (100–120 m). Srednji pretok v profilu HE je $230 \text{ m}^3/\text{s}$, visoki pretok s 100-letno povratno dobo pa $3750 \text{ m}^3/\text{s}$. Največji ugotovljeni pretok, ki je nastopil ob novembrski poplavi leta 1990, je po zadnjih analizah znašal $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Hidroinštitut, IBE in FGG, 2012).

Od levega brega proti desnemu se zvrstijo deli *jezovne zgradbe*: priključni nasip (nasuta pregrada) minimalne dolžine 12 m, pet prelivnih polj, strojnica in obsežnejše servisne površine na desnem bregu (slika 1). V okviru ureditev na desnem bregu je tudi *prehod za vodne organizme* v obliki klasične, stopničaste ribje steze. Prelivna polja širine 15 m so opremljena s segmentnimi zapornicami višine 8,17 m, na katerih so dodatne zaklopke višine 2,95 m. Vmesni stebri med prelivnimi polji so široki 3 m, precej večjih dimenzij pa je levi krilni zid z dolžino 36 m in največjo višino 14,60 m. Prelivni pragovi se na dolvodni strani nadaljujejo v 36 m dolga in 2,7 m globoka podslapja (umirjalne tolmune), ki so opremljena vsako s po petimi *razbijači* za dodatno disipacijo energije vodnega toka.

Strojnico HE Krško v spodnjem delu pod koto 166,00 sestavljajo trije pretočni trakti Kaplanovih turbin, v zgornjem delu pa strojnična dvorana s kontrolnimi in pomožnimi prostori (slika 2). Spodnji del je izveden v obliki masivnih betonov, zgornji pa kot klasična škatlasta AB-konstrukcija. Tlorisna dolžina strojnice je približno 58 m, širina pa 20 m. Najnižja točka temeljenja je na koti 134,65 m n. m. in najvišja točka strešne konstrukcije na koti 173,90 m n. m., kar pomeni skupno konstrukcijsko višino 39,25 m.



Slika 1 • Situacija jezovne zgradbe HE Krško; A – prelivna polja 1 do 5; B – strojnica z agregati 1 do 3; C – prizidek za stikališče in druge prostore; D – spodnji (montažni) plato; E – zgornji plato; F – prehod za vodne organizme



Slika 2 • Vzdolžni prerez skozi pretočni trakt HE Krško

Kota zajezišča HE Krško je 164,00, kar ob inštaliranem pretoku $500 \text{ m}^3/\text{s}$ zagotavlja 9,3 m (po izgradnji HE Brežice pa

9,23 m) bruto hidravličnega padca in s tem povprečno 155 GWh letno proizvedene električne energije. Prostornina akumulacije

je 6309 hm³, od česar je 1178 hm³ koristne prostornine, ki jo je v skladu s koncesijskimi pogoji mogoče ob denivelaciji bazena za največ 1 m izrabljati za proizvodnjo vršne (variabilne) energije.

Zaradi ozke doline in omejitev, ki sta jih narekovali glavna cesta na desnem bregu in železniška proga na levem, so montažne in manipulacijske površine dimenzionirane skromneje kot na drugih stopnjah verige HE.

Na levem bregu je tako le manjši deponijski prostor za pomožne zapornice, na desnem pa običajna dolvodna in gorvodna ploščad (plato), pomembno površino pa zavzema tudi prehod za vodne organizme.

3 • IZVEDBENI PROBLEMI HE KRŠKO

Zaradi nedostopnosti levega brega, omejenega prostora v ozki rečni dolini, bližine ceste in železniške proge ter globokih izkopov v lokalno močno pretrti dolomitni hribini je bila izvedba HE Krško drugačna in deloma zahtevnejša od izvedbe gorvodnih stopenj. V naslednjih poglavjih so na kratko podane projektantske rešitve naštetih problemov.

3.1 Dostop na levi breg

Prva rešitev dostopa na levi breg je predvidevala začasen gradbiščni most, vendar je bila že zgodaj v fazi priprave državnega lokacijskega načrta nadomeščena s trajnim mostom kot osnovnim elementom bodoče obvoznice Krškega po levem bregu. S takšno rešitvijo je bila ustvarjena sinergija izpolnitve potreb lokalne skupnosti in potreb pripravljanih del za gradnjo HE. Most je bil prvi objekt, ki je bil v začetku leta 2008 zgrajen v okviru izvedbe DLN za HE Krško in je omogočil začetek gradnje v prvi gradbeni jami na levem bregu. V času del v drugi gradbeni jami je most omogočil uporabo trase obvoznice kot servisne in gradbiščne ceste za izvedbo poglobitvenih del v strugi dolvodno od HE Krško. V skladu z dogovorom med investitorji, ministrstvom za promet in zveze (zanj DRSC), občino Krško in HESS je predaja mostu in obvoznice v javno uporabo predvidena šele po dokončanju HE Krško. Pri tem predstavlja v okviru DLN za HE Krško izvedeni odsek z novim mostom le del integralne rešitve za Krško; v različnih fazah načrtovanja je tudi že sklop ureditev v zvezi z novim, južnim »vrbinskim« mostom, ki se vsebinsko bolj navezuje na ureditve HE Brežice in na ureditve za poplavno zaščito NE Krško.

3.2 Gradnja v ozki rečni dolini

Rešitev za ta problem je bila fazna gradnja v dveh gradbenih jamah (slika 4). V prvi gradbeni jami so se izvedla štiri prelivna polja s pripadajočim levoobrežnim zidom in nasuto (priključno) pregrado. Poleti 2009. je bila Sava preusmerjena preko dokončanih štirih prelivnih



Slika 3 • Gradbišče HE Krško po zaprtju druge gradbene jame z dokončanimi štirimi prelivnimi polji in novim mostom obvoznice Krško (poletje 2009). Cesta G1-5 še poteka po stari trasi, vidna pa je izvedba del za njeno prestavitev proti pobočju

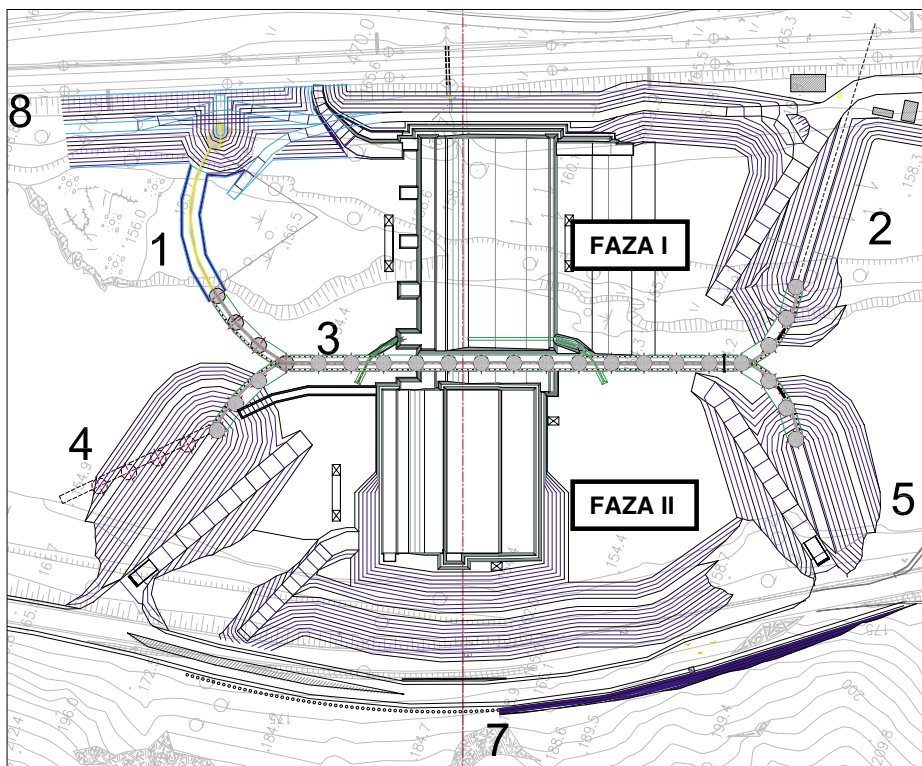
polj in začela se je izvedba del v drugi gradbeni jami (slika 3). V primerjavi z gorvodnimi stopnjami verige HE, kjer so dela potekala vedno le v eni gradbeni jami, je to pomenilo podaljšanje časa gradnje za eno leto. Za zaščito gradbenih jam so bile uporabljene takšne tehnične rešitve, ki so omogočile hitre prehode med posameznimi fazami in so bile prilagojene razpoložljivi opremljeni gradbenih izvajalcev.

Zaščito **prve gradbene jame** so predstavljali gorvodna (začasna) ločna pregrada, 21 betonskih vodnjakov premera 6 m z vmesnimi polnili in konzolno nadgradnjo ter dolvodna nasuta skalometna pregrada, tesnjena do matične hribine. Zaščita **druge gradbene jame** je bila zagotovljena z gorvodno skalometno pregrado, tremi dodatnimi in štirimi obstoječimi betonskimi vodnjaki, manjšo gorvodno ločno pregrado, naslonjeno na peti steber prelivnih polj, ki je bil na dolvodnem delu opremljen z dodatnim konzolnim zidom, dolvodno ločno pregrado, petimi obstoječimi

betonskimi vodnjaki ter z dolvodno nasuto skalometno pregrado. Tesnjenje betonskih objektov prve in druge gradbene jame je bilo zagotovljeno z izvedbo neposredno na matično hribino (kontaktno), za skalometni pregradi pa je bila uporabljena tehnologija jet-grouting. Razen petega stebra prelivnih polj in prednapetih sider v vodnjakih so bili vsi betonski elementi začasnih zaščit nearmirani.

3.3 Vplivi na železnico in cesto

Na levem bregu Save je bil glavni infrastrukturni problem zaščita proge Ljubljana–Zagreb, katere os se je na najbolj izpostavljenem mestu na 20 m približala 25 m globokemu izkopu za izvedbo prvega prelivnega polja. Pogoji Slovenskih železnic so vključevali tudi uporabo dveh različnih metod za potrditev stabilnosti izkopa: klasično ravnovesno metodo Janbu in analizo po MKE. Zanimivo je, da so bili doseženi dejavniki varnosti po obeh metodah praktično enaki. Zaščita izkopa je



Slika 4 • Situacija gradbenih jam HE Krško; I in II: prva in druga faza; 1: gorvodna začasna ločna pregrada; 2 in 5: dolvodni začasni pregradi; 3: vzdolžna vodnjaška stena; 4: gorvodna začasna pregrada; 7: cesta G1-5; 8: železniška proga Ljubljana–Zagreb. Za dostope v drugo gradbeno jamo je prikazana projektantska rešitev; dejansko je bil za dolvodni del druge gradbene jame izveden nekoliko drugačen dostop

bila opravljena z uporabo prednapetih sider, pasivnih SN-sider in torkretiranjem (slika 5). Pomemben element izvedbe je bil tudi čim hitrejša zapolnitev vmesnega prostora med steno izkopa in konstrukcijo, saj so dela potekala jeseni in se je bilo treba izogniti tveganju razmočitve zaledne hribine.

Na desnem bregu je podoben problem predstavljala glavna cesta G1-5 Celje–Krško. Za zagotovitev potrebnega prostora za strojnico, servisne površine in prehoda za vodne organizme je bilo treba os ceste prestaviti proti brežini za več kot 11 m. Gorvodno od osi pregrade je bilo treba niveleto ceste dvigniti

najmanj 1,5 m nad nivo bodoče zaježitve. Kot končna je bila privzeta rešitev z betonskimi slopi in podpornimi zidovi, kot je razvidno s slike 6. Izkopi za drugo gradbeno jamo so na desnem bregu doline dosegli globino 31 m pod niveleto ceste, vendar so bili od nje oddaljeni približno 40 m, tako da dinamične obremenitve in posledično varnostne zahteve niso bile tako stroge kot pri železnici. Nakloni izkopa so bili prilagojeni kakovosti hribine, za zaščito brežine pa se je tudi tukaj opravilo pasivno sidranje in torkretiranje na večji površini, saj je bilo treba zagotoviti dolgotrajnejšo varnost dela v gradbeni jami.

3.4 Dolomitna hribina

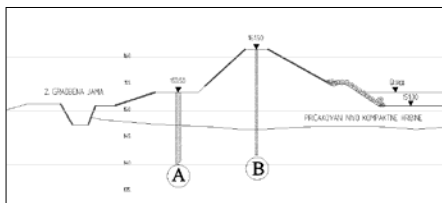
Geološke raziskave so že v zgodnjih fazah projekta pokazale več (neaktivnih) prelomnih con, na območju katerih je bilo pričakovati močno pretrto dolomitno hribino. V skladu s sliko prelomnih con so bili predvideni dodatni ukrepi na območju tesnitve pregradnega profila in na območju zaščite gradbenih jam (vodnjakov). V gradbenih jamah se je pretrtost hribine demonstrirala predvsem v povečani vodoprepustnosti in v posameznih detajlih, kjer so bile potrebne sanacije površin, predvsem zaradi zaščite delovišč. V prvi gradbeni jami so potrebe po črpanju drenažne vode znašale do 200 l/s, v drugi pa so zaradi bistveno globljih izkopov in umeščenosti v obstoječo strugo Save tudi dosegle in presegle 1000 l/s. Eden od razlogov za povečano prepustnost je bila v prvi fazi izvedbe druge gradbene jame tudi hidrogeološka anomalija na območju dolvodne zaščitne pregrade: šele s tesnilnim vrtnjem je bila registrirana lokalna globoka



Slika 5 • Zaščita izkopa za prvo gradbeno jamo (pod železniško progo)



Slika 6 • Zaščita izkopa za drugo gradbeno jamo (pod cesto G1-5)



Slika 7 • Tesnjenje dolvodne nasute (zaščitne) pregrade; osnovna (B) in dodatna (A)



Slika 8 • Začasna gorvodna ločna pregrada; v ospredju stik z vodnjaško steno, v ozadju masiven oporni betonski blok



Slika 9 • Začasna gorvodna ločna pregrada; pogled z gorvodne strani



Slika 10 • Vodnjaška stena, izvedba vodnjakov; med vidnima izdelanim in opaženim vodnjakom manjka še eden. Vmesni deli med vodnjaki se prav tako opažijo in zalijejo z betonom



Slika 11 • Vodnjaška stena, izvedba konzole. Levo in desno od konzole sta vidni sidrni gredi za sidranje vodnjakov, v ozadju pa začasna ločna pregrada



Slika 12 • Peti steber prelivnih polj z začasno dolvodno ločno pregrado in florisno lomljenim konzolnim zidom (skrajni levi del slike). Na desni je vidna ne odstranjena in neaktivna konzola vodnjaške stene

prelomna cona pod rečnim dnom. Njen učinek je bil razmeroma uspešno saniran z dodatno tesnilno zaveso (slika 7), ki strokovno sicer ni dosledna, vendar je omogočila še sprejemljive črpalne količine drenažne vode ob večini savskih pretokov.



Slika 13 • Začasna gorvodna ločna pregrada in gorvodna zaščita druge gradbene jame

3.5 Nprekinjena faznost gradnje

Za zagotovitev nemotenega poteka del s čim krajšimi prekinitvami med posameznimi fazami je bilo uporabljenih več začasnih konstrukcij, ki so bile deloma že preizkušene na podobnih objektih v Sloveniji.

Gorvodna ločna pregrada (sliki 8 in 9, glej tudi sliko 4) je bila del zaščite prve gradbene jame. Krona te začasne pregrade je imela širino 1 m, njena debelina pa se je navzdol na vsake 4 metre višine povečala za 25 cm. Največja višina je znašala 11 m, ločni učinek pa je bil dosežen na eni strani z oprtjem na vodnjaško steno in na drugi strani na poseben masivni betonski blok prostornine 100 m³. Pregrada je bila v celoti nearmirana in je imela že ob izvedbi vgrajene elemente za kasnejšo odstranitev (miniranje). Takšna rešitev je po dokončanju del v prvi gradbeni jami omogočala hitro odstranitev miniranega betona in preusmeritev Save kot pogoj za začetek del v drugi fazi gradnje.

Vodnjaška betonska stena (sliki 10 in 11), ki se je v podobni obliki uporabila že pri gradnjah HE Boštanj in HE Blanca, je bila ključni element zaštite gradbenih jam in je bila z modifikacijami aktivna v vseh fazah gradnje HE Krško. Njena debelina spodaj je bila 6 m. Na vrhu vodnjakov je bila 5 m visoka konzola, največja skupna višina pa je bila 11 m. Zaradi prevzema obojestranskih hidrostatičnih tlakov v posameznih fazah gradnje je bila vodnjaška stena sidrana na obeh straneh. Vodnjaki niso bili armirani, je pa bila armirana konzola na kroni.

Peti steber prelivnih polj je del trajne konstrukcije HE Krško, ki je imel v času gradnje HE tudi vlogo začasne zaštite druge gradbene jame. Ta vloga je zahtevala nekaj dodatnih prilagoditev: nižji, dolvodni del stebra (glej tudi sliko 3) je bilo treba povišati z začasnimi konzolnim zidom, steber pa na gorvodnem in dolvodnem koncu povezati z vodnjaško steno. To je bilo izvedeno z dvema manjšima ločnima pregradama višine 13,7 m, ki sta



Slika 14 • Dolvodni pogled na razpore v petem prelivnem polju



Slika 15 • Detajli stika z vertikalno in povezave nosilcev v razporah

imeli v kroni debelino 30 cm, v temelju pa 160 cm (sliki 12 in 13). Pregradi nista bili armirani in sta brez posledic prestali popolno prelivanje med ekstremnimi poplavami v septembru 2010. Izvedba konzolnega zidu, ki je bil v florisu lomljen (slika 12), je bila podobna kot za konzolni zid na vrhu vodnjaške stene (slika 11). Stabilnost petega stebra prelivnih polj kot izredno vitke konstrukcije je bila zagotovljena z opiranjem na vodnjaško steno v prvi gradbeni jami in z izvedbo posebnih razpor v drugi gradbeni jami.

Začasne razpore v petem prelivnem polju so nadomestile originalno projektno rešitev, po kateri bi bil peti stebel v drugi gradbeni jami podprt z masivnimi trikotnimi betonskimi podporami. Osnovna rešitev je bila opuščena zaradi rokovnih pritiskov in zaradi potrebe po

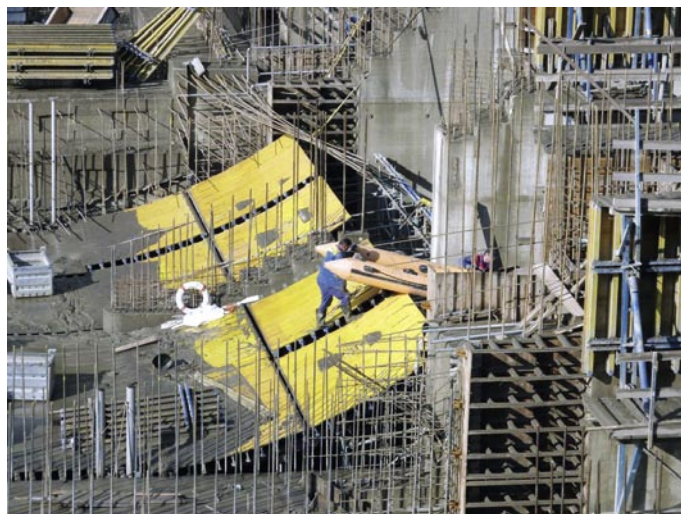
izvedbi podpor ob zmanjšani poplavni varnosti. Podpiranje petega stebra prelivnih polj je bilo potrebno za primer nastopa poplave v času izgradnje petega prelivnega polja, saj v takšnem primeru nepodprti stebel ne bi mogel prevzeti zunanega hidrostatičnega tlaka. Za razpiranje se je uporabilo petkrat po dva povezana montažna prednapeta AB-nosilca dolžine 15 m, ki sta bila na savski strani s konzolo oprta na peti stebel prelivnih polj, na strani gradbene jame pa na isti način na šesti stebel prelivnih polj. Pod razporami so se jeseni 2011 izvedla vsa dela za izvedbo petega prelivnega polja, vključno z montažo hidromehanske opreme.

Najdaljše in **nenačrtovane prekinitev del** so se zgodile ob dveh poplavah v decembru 2009 in septembru 2010, obakrat v času

izvedbe del v drugi gradbeni jami. Prva poplava s pretokom Save 2466 m³/s (glej tudi naslovnico Gradbenega vestnika iz februarja 2010) je zaradi zgodnje faze z izvedenimi izkopi in zaščitami gradbene jame ter začetnimi temeljnimi bloki strojnice pustila le manjše posledice, ker pravzaprav ni bilo prelivanja iz Save, temveč le kontrolirano zalivanje jame z izklopom črpališč. Ob drugi poplavi je pretok Save znašal 3680 m³/s in je bila gradbena jama popolnoma zalita preko vseh zaščit, razen preko dolvodne pregrade (slika 16). Po umiku vode in delnem rušenju spodnje pomožne pregrade zaradi hitrejše evakuacije vode iz gradbene jame je sledilo dolgotrajno čiščenje naplavin z betonov in armature, ki so bili takrat v fazi kompleksne izvedbe (slika 17).



Slika 16 • Poplava na območju gradbišča HE Krško (19. september 2010)



Slika 17 • Odpravljanje posledic poplave v septembru 2010

4 • SKLEP

Hidroelektrarna Krško se gradi od konca leta 2007 in bo v letu 2012 zaključena v predvidenem roku. S tem se bo pridružila uspešno zaključenima gorvodnima stopnjama HE

Boštanj in HE Blanca. Vse tri potrjujejo sposobnost slovenskih projektantov, izvajalcev in dobaviteljev opreme za realizacijo teh zahtevnih objektov. Na specifični lokaciji Krško je moral

projektant obvladati delo v pogojih omejenega prostora za gradnjo, kar bo mogoče koristno uporabiti med drugim pri gradnji HE na srednji Savi, kjer je podobnih ali še bolj utesnjenih lokacij več.

5 • ZAHVALA

Prvi avtor se osebno zahvaljujem kolegu Jerneju Vončini za angažirano in dosledno iskanje, usklajevanje in spremljavo izvedbe projektnih rešitev HE Krško v fazi priprave PZI in izvedbe objekta.

Za dovoljenje za objavo slike 16 se zahvaljujemo Občini Krško in JP Infra, d. o. o.

Investitor HE Krško so Hidroelektrarne na spodnji Savi (HESS), pri investiciji v infrastrukturne ureditve sodeluje tudi JP Infra, Krško. Glavni izvajalec del je Primorje, Ajdovščina. Projektant HE Krško je IBE, d. d., Ljubljana, inženir pa HSE Invest, Maribor.

6 • LITERATURA

Hidroinštitut, IBE in FGG, 2012, Izvedba hibridnih hidravličnih modelov za območje spodnje vode HE Krško, območje HE Brežice in območje HE Mokrice, Hidravlična modelna raziskava toka Save skozi Krško, Dopolnjeno poročilo, Poročilo 929-dop, januar 2012.

IBE, 2005–2012, HE Krško, dokumentacija IDZ, IDP, PGD, PZI, PID, naročnik HESS, št. projekta IBKK-A200/023B.

ŠIRCA, A., JOSIPOVIČ, Z., KVATERNIK, K., MOČNIK, I., SOMRAK, D., Večnamenski projekt hidroelektrarn na spodnji Savi, Gradbeni vestnik, letnik 59, april 2010.