

**Mateja KLUN\***

**Tilen KORANTER**

**Miha KRAČUN**

**Rožle LAVRAČ**

**Nejc MOHORIČ**

**Miha POGAČAR**

**Matej RADINJA**

**Helena ŠOŠKO**

**Tanja TOFIL**

**Maja WEISSEISEN**

## **MODELIRANJE STOJEČEGA VALA ZA VODNI ŠPORT**

### **1. POVZETEK**

V okviru razpisa »Po kreativni poti do praktičnega znanja« je v sodelovanju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, Fakultete za strojništvo in družbe HESS d.o.o. 10 študentov skupaj z mentorji izdelalo idejno zasnovo za objekt z vodnim skokom, ki omogoča vodni šport (surfanje). Za optimalno dimenzioniranje so bile raziskane lastnosti toka vode čez objekte in lastnosti hidravličnega skoka, najprej teoretično, nato je bil v laboratoriju za mehaniko tekočin izdelan fizični model, na katerem so bile opravljene meritve. Z brezdimenzijsko analizo je bila poiskana enačba, ki je najbolje opisala merjene zakonitosti. Hkrati je potekalo tudi numerično modeliranje, rezultati modeliranja pa so bili uporabljeni še za analizo postopka umeščanja v prostor. Izvedena je bila analiza podobnih primerov rečnega surfanja v tujini in študij slovenske zakonodaje. Končna rešitev je bila predlagana v prostor na območju HE Brežice. Za izbrano varianto je bila izdelana idejna zasnova umestitve objekta za stoječi val v sklopu kajakaške steze, ki je predvidena na levem bregu reke Save. Z »analizo stroškov in koristi« in upoštevanjem pogoja pozitivne neto sedanje vrednosti je bila izvedena investicijska presoja izvedbe objekta. S tem smo dobili potrditev, da je tovrstni objekt možno postaviti ob energetske objekti, pri tem pa so bili raziskani še razlogi »za« kot tudi »proti« in same meje izvedljivosti. Projekt prinaša dodatno turistično ponudbo, saj gre za športno panogo, ki je zelo zanimiva in v porastu. Prav tako je zanimiva lokacija v Brežicah, saj je pomemben vplivni faktor bližina večjih mest (Zagreb, Ljubljana, Maribor), kar je idealna priložnost za širjenje prepoznavnosti športa in popestritev turistične ponudbe v območju.

### **2 UVOD**

Izziv projekta je bil dimenzioniranje vodnega objekta, s katerim bi ustvarili pogoje za nastanek stoječega vala s karakteristikami, ki omogočajo surfanje oz. deskanje na vodi. Za potrebe optimalnega dimenzioniranja so bile raziskane lastnosti toka vode čez objekte in lastnosti vodnega skoka oz. stoječega vala. V prvi fazi je bil na katedri za mehaniko tekočin z laboratorijem izdelan in preizkušen model v vodnem kanalu, nato s pomočjo ustrezne računalniške opreme pripravljen numerični model, sledilo pa je še umeščanje v prostor in investicijska presoja. Rezultat dela je bila idejna zasnova objekta, ki omogoča vodni šport ob HE Brežice.

---

\* Mateja KLUN, dipl. inž. grad. (UN), Tilen KORANTER, dipl. inž. ok. grad. (UN), Miha KRAČUN, dipl. inž. ok. grad. (UN), Rožle LAVRAČ, dipl. inž. ok. grad. (UN), Nejc MOHORIČ, dipl. inž. grad. (UN), Miha POGAČAR, dipl. inž. str. (UN), Matej RADINJA, dipl. inž. ok. grad. (UN), Helena ŠOŠKO, dipl. inž. ok. grad. (UN), Tanja TOFIL, dipl. inž. ok. grad. (UN), Maja WEISSEISEN, dipl. inž. grad. (UN)

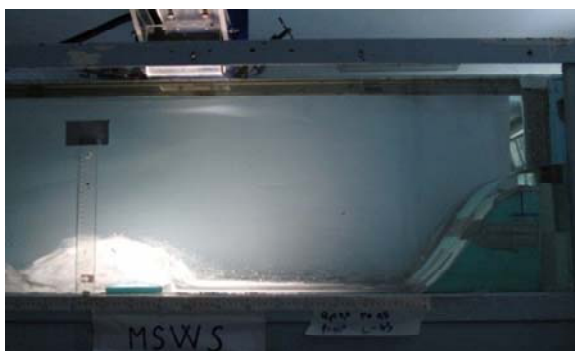
Cilj projekta je bil prikaz možnosti umestitve tovrstnega objekta ob energetske objekte, saj je prostor ob njih že degradiran in mu tako pripišemo novo (dodatno) rabo, hkrati pa je poseg v okolje manjši. Izvedba takšnega projekta bi bila dodatna pridobitev za HE in okolico, saj bi tako razširili športno in turistično ponudbo na območju. Prav tako pa bo dobljene rezultate možno z določenimi prilagoditvami aplicirati na območja ob jezovnih zgradbah drugod po Sloveniji.

### 3 MODELIRANJE V LABORATORIJU

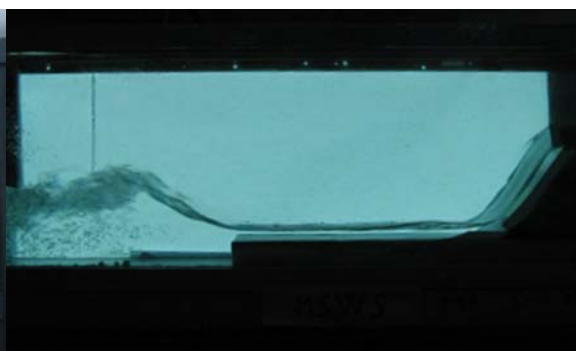
Meritve so bile izvedene v žlebu, ki se nahaja v laboratoriju na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo, na oddelku za okoljsko gradbeništvo. Za izdelavo modelov je bilo potrebno uporabiti materiale, ki omogočajo enostavno izdelavo in hitro pritrjevanje ter odstranjevanje. Na podlagi eksperimentov je bilo zaključeno, da je najbolj primeren material ekstrudiran polistiren (XPS), pritrjen z lepilnim trakom iz polietilenske folije, ojačane s sintetično tkanino, ki je 100 % vodoodporen.

Pri modeliranju v laboratoriju je potrebno upoštevati podobnostne kriterije: geometrijske, kinematične (gibanje) in dinamične (razmerje sil). Ker je na enem modelu nemogoče zadostiti vsem trem podobnostim kriterijem, se vedno izbere najbolj relevantni pogoj. Za potrebe modeliranja stoječega vala za potrebe vodnih športov je bil tako upoštevan Froudov zakon modelne podobnosti. Ta je primeren predvsem za modeliranje tokov, ki so pretežno pod vplivom težnosti. Pri tem je potrebno doseči geometrijsko podobnost in enakost Froudovega števila na modelu in prototipu (Chanson, 1999).

Meritve so se izvajale na dveh geometrijskih zasnovah, ki sta prikazani na slikah 1 in 2. Najprej je bil zasnovan tok vode čez preliv s pragom v podslapju, nato pa še tok vode čez preliv s poglobitvijo v podslapju.

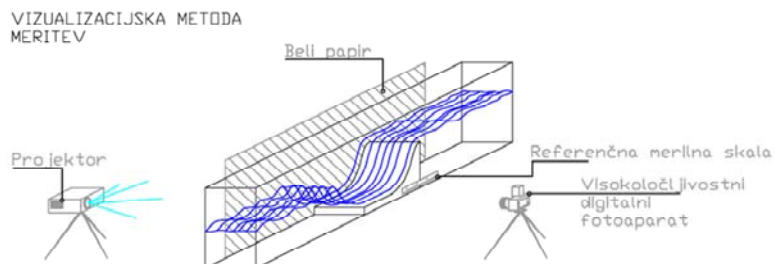


Slika 1: Zasnova s pragom v podslapju (Tilen Koranter)



Slika 2: Zasnova s poglobitvijo v podslapju (Rožle Lavrač)

Za začetne meritve so bile uporabljene dotikalne metode z ostrim merilom. Za merjenje končnih meritev pa je bila uporabljena nedotikalna oziroma vizualizacijska metoda meritev, pri čemer je bila uporabljena hitrostna kamera Casio EX-F1. Shematski prikaz meritve in postavitve opreme pri vizualizacijski metodi je prikazan na sliki 3. Posnetki so bili analizirani s pomočjo računalniške opreme, ki deluje na principu razmerij, pri čemer je bil uporabljen prosto dostopni program PlotDigitizer. Na vsakem posnetku je bila prisotna merilna skala, s katere program pridobi dolžinske enote in tako poda želeno dimenzijo.



Slika 3: Postavitev instrumentov za izvedbo vizualne meritve na primeru poglobitve

Na podlagi merjenih veličin je bila izdelana brezdimenzijska analiza, katere namen je bil pridobitev relacije med merjenimi parametri. S pomočjo omenjene analize sta bili tako zapisani enačbi, ki v prihodnje omogočata prenos rezultatov meritev v naravo. Brezdimenzijska analiza temelji na dveh osnovnih izrekih:

- vse povezave med fizikalnimi količinami v naravi se morajo dimenzijsko ujemati,
- nobena fizikalna korelacija ne sme biti odvisna od katerekoli merske enote (Krogstad, 2011).

Porazdelitev mnogih fizikalnih fenomenov sledi potenčnemu zakonu, ki ga lahko v osnovi obliki z upoštevanjem brezdimenzijskih števil zapišemo s sledečim izrekom (Clauset et al, 2009):

$$\pi_0 = k \cdot \pi_1^\alpha \cdot \pi_2^\beta \cdot \pi_3^\gamma \cdot \dots \quad [1]$$

k ... konstanta modela, s katero zajamemo vplivne parametre, katerih nismo merili in upoštevali v računu  
 $\alpha, \beta, \gamma$  ... merila za velikost vpliva posameznega parametra

Uporaba potenčnega zakona za ta specifični primer je primerna, saj so izmerjeni in določeni vsi parametri, ki nastopajo v enačbi. Odvisna spremenljivka je višina stoječega vala ( $h_{val}$ ), neodvisni parametri pa so vsi ostali merjeni parametri. Brezdimenzijska števila dobimo tako, da vse veličine delimo z enotsko vrednostjo (1/fizikalna enota), sledi pa zapis potenčnega zakona. Iz potenčnega zakona lahko dobimo sistem enačb, ki ga z logaritmiranjem prevedemo v sistem linearnih enačb, te pa rešujemo numerično, v programskem orodju Mathematica.

Pridobljena enačba za prag v brezdimenzijski obliki:

$$h_v = k * q^{0.806} * p^{-0.077} * l^{0.013} * h_s^{-0.245} \quad [2]$$

$h_v$  ... višina vala [m]      p ... prag [m]  
k ... konstanta = 0.009      l ... razdalja [m]  
q ... pretok [m<sup>3</sup>/s]       $h_s$  ... globina spodnje vode [m]

Iz vrednosti potenc je razvidno, da ima pretok velik vpliv na višino vala. Ta rezultat je pričakovan - večji kot je pretok vode, večja je globina in večji potencial je na razpolago za dvig gladine vala. Val povečuje tudi dolžina oddaljenosti praga od preliva, kar je posledica velikega naklona žleba v laboratoriju (10 %). Prav tako pa so se meritve izvajale samo, če je bil val gladek in vsaj delno primeren za surfanje, kar tudi ima določen vpliv na rezultate. Višina praga hkrati vzbuja val, vendar ga tudi zmanjšuje, saj vnaša oblikovni upor. Energija se tako porablja in je manj ostane za val. Ob premajhnem pretoku in naklonu se lahko zgodi, da voda nima dovolj energije za prelitje preko praga, zato pride do zajeze. Višino vala znižuje tudi globina vode v spodnjem bazenu, kar je nepričakovano, saj bi spodnja voda morala podpreti val in tako omogočiti višji, stabilnejši in bolj gladek val. Rezultat je najverjetneje posledica dejstva, da so bile meritve izvedene samo, če je bil val vsaj delno primeren za deskanje, kar zmanjša območje parametrov.

Pridobljena enačba za pogolobitev v brezdimenzijski obliki:

$$h_v = k * q^{0.548} * s^{0.025} * l^{0.327} * h_s^{-0.390} \quad [3]$$

$h_v$  ... višina vala [m]      s ... stopnja [m]  
k ... konstanta = 0.023      l ... razdalja [m]  
q ... pretok [m<sup>3</sup>/s]       $h_s$  ... globina spodnje vode [m]

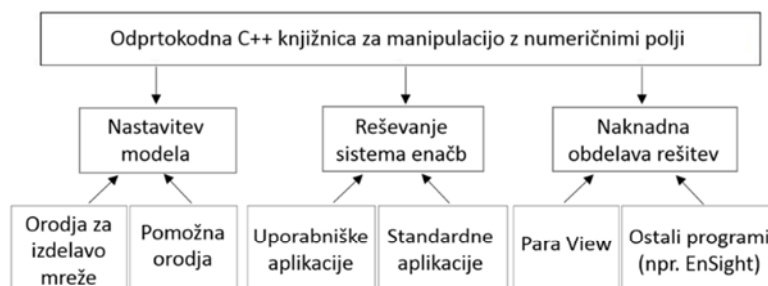
Tudi pri tej zasnovi višino vala povečuje pretok, kar je smiselno, saj več vode pomeni večjo globino in tako tudi višji val. Višino povečujeta tudi stopnja oziroma poglobitev. Prav tako na višino pozitivno

vpliva razdalja od preliva, kar pa ni bilo pričakovano. Z dolžino se namreč sila trenja povečuje in bi morala tako višina vala padati, saj je na voljo manj energije, vendar lahko tu ponovno govorimo o vplivu velikega naklona. Višino vala znižuje globina spodnje vode, kar ni bil pričakovani rezultat, saj višja spodnja voda predstavlja večjo podporo valu in bi zato moral biti ta višji. Tudi ta rezultat je lahko delno posledica dejstva, da so bile meritve opravljene samo na primernih valovih. Če je bila spodnja voda previsoka, je namreč prišlo do vrtinca - val je bil sicer visok, vendar neprimeren za surfanje.

Iz izvedenih meritev je bila uspešno narejena brezdimenzijska analiza, pri čemer so vse končne korelacijske analize dale vrednosti koeficienta približno 0.8, kar kaže na dobro ujemanje. Za končno optimizacijo bi bilo potrebno izvesti več meritev z natančnejšim merjenjem spodnje vode in drugih dodatnih spremenljivk. Vsekakor pa bi bilo potrebno izvesti nadaljnje meritve na večjem modelu. Na podlagi opravljenih meritev in analiz je predlog končne rešitve izvedba vala za surfanje s pomočjo poglobitve, saj se je ta rešitev pokazala za precej varnejšo. V primeru padca surfer pade v globljo vodo, brez ostrih robov. Zavarovanje je lahko tako manj obsežno in posledično bolj ekonomično. Pridobljene enačbe veljajo samo v ovojnici vrednosti, ki so bile izmerjene in analizirane med meritvami. Ekstrapolacija enačbe krivulje na bližnje vrednosti ni bila izvedena, ker se je med meritvami pokazalo, da lahko že majhne spremembe parametrov popolnoma spremenijo obliko vala in turbulentnost toka.

## 4 NUMERIČNA SIMULACIJA Z UPORABO PROGRAMSKE OPREME OPENFOAM

Numerični model je bil izdelan v odprtokodnem programskem paketu OpenFOAM (angl. Open Field Operation And Manipulation) za računalniško dinamiko tekočin (angl. Computational Fluid Dynamics - CFD). Paket vsebuje aplikacije in jezikovne knjižnice v programskem jeziku C++, ki jih je mogoče poljubno spremeniti za potrebe posameznega sklopa simulacije.



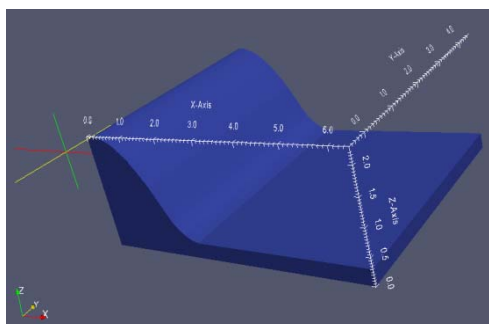
Slika 4: Shematski prikaz okolja OpenFOAM (povzeto po Ehrenwirth, 2013)

Simuliran je bil dvofazni tok s prosto gladino, računsko domena pa je bila formulirana po metodi končnih volumnov. Za predpis turbulence je bil uporabljen dvo-enačbni k- $\omega$  SST model (Menter, 1994) za reševanje povprečenega sistema enačb.

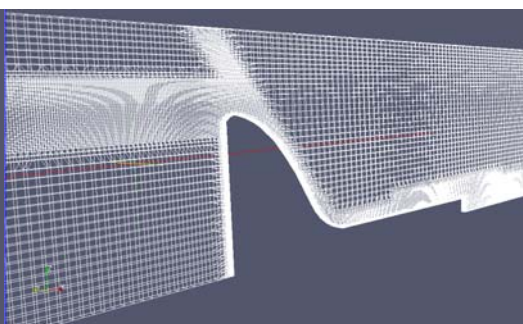
$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ -p \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] \quad [4]$$

Uporabljene so bile vgrajene stenske funkcije, pri čemer je bil za sledenje medfazne površine uporabljen model VOF (angl. Volume Of Fluid) (Hirt in Nichols, 1981).

Numerični model je bil ustvarjen s povzetjem učnega primera iz privzete zbirke programskega paketa ter spremembo ustreznih nastavitev (Reidar Boe Olsen), ki so prikazane v preglednici 1. Geometrija prelivnega objekta predstavlja Creagarjev preliv s poglobitvijo, katerega ustreznost je bila eksperimentalno potrjena v laboratoriju. Kontura je bila nato izrisana v programu AutoCAD 3D in vnesena v model preko .STL formata (angl. Standard Tessellation Language) in OpenFOAM funkcije *snappyHexMesh* za vnos predhodno predpisanih oblik. Podatek o 10 % naklona kanala, ki je bil uporabljen pri eksperimentalnem delu v laboratoriju, pa smo upoštevali tako, da smo vektor gravitacijskega pospeška razstavili na ustrezne komponente.



Slika 5: Geometrija preliva, uvoženega s .STL datoteko



Slika 6: Numerična mreža z zajeto geometrijo preliva (desno)

Domena zgornje vode (pred pregrado) je bila podaljšana z namenom ustrezne natočne razdalje za razvoj toka. Kot referenčne vrednosti za profil hitrosti pa so bile uporabljene in izračunane vrednosti, pri čemer smo upoštevali minimalni padec, potreben za izračun zelenih veličin.

Preglednica 1: Predpis robnih pogojev v OpenFOAM

	<b>alpha.water</b>	<b>k</b>	<b>omega</b>
<b>inletAir</b>	<i>fixedValue</i> of 0	<i>fixedValue</i> of 2.16e-4	<i>fixedValue</i> of 0.1470
<b>inletWater</b>	<i>fixedValue</i> of 1	<i>fixedValue</i> of 2.16e-4	<i>fixedValue</i> of 0.1470
<b>Outlet</b>	<i>zeroGradient</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>zeroGradient</i>
<b>Atmosphere</b>	<i>inletOutlet</i>	<i>inletOutlet</i> of 2.16e-4	<i>inletOutlet</i> of 0.1470
<b>bottomWall, preliv</b>	<i>zeroGradient</i>	<i>kqRWallFunction</i>	<i>omegaWallFunction</i>
<b>front, back, defaultFaces</b>	<i>empty</i>	<i>empty</i>	<i>empty</i>

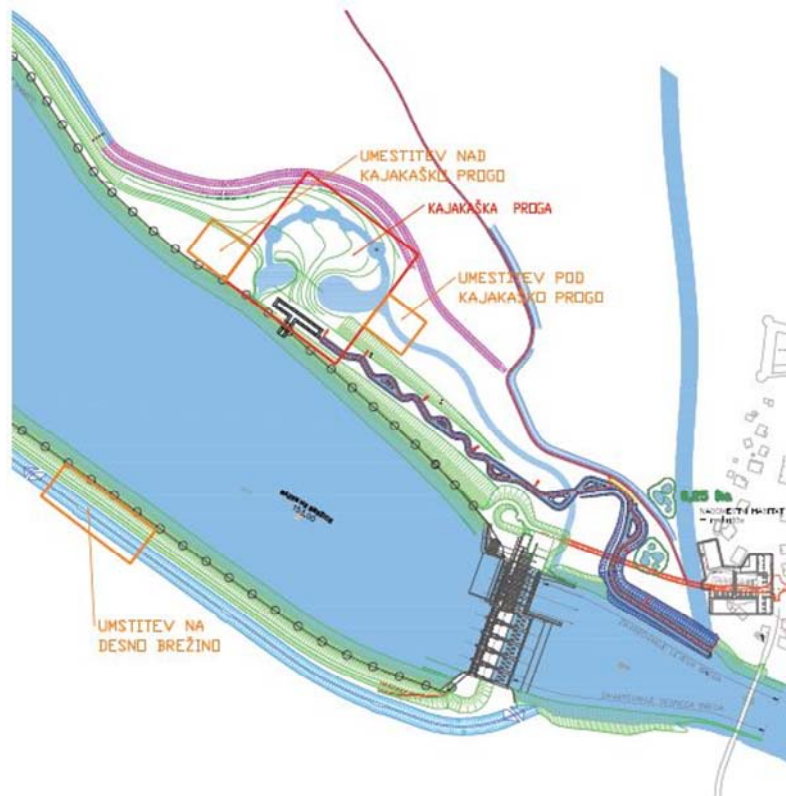
	<b>p_rgh</b>	<b>U</b>
<b>inletAir</b>	<i>fixedValue</i> of 0	<i>fixedValue</i> of (0 0 0)
<b>inletWater</b>	<i>fixedValue</i> of 0	<i>fixedValue</i> of (0.625 0 0)
<b>Outlet</b>	<i>zeroGradient</i>	<i>zeroGradient</i>
<b>Atmosphere</b>	<i>totalPressure</i>	<i>pressureInletOutletVelocity</i> of 0
<b>bottomWall, preliv</b>	<i>buoyantPressure</i> of 0	<i>fixedValue</i> of (0 0 0)
<b>front, back, defaultFaces</b>	<i>empty</i>	<i>empty</i>

Zaradi velike računske zahtevnosti problema smo računsko domeno razdelili na večje število predelov, kar je omogočilo vzporedno računanje. Uporabljena je bila scotch metodologija, ki domeno razdeli na predele z enakim številom celic. Parametri razdelitve so opisani v knjižnici OpenFOAM funkcije *decomposePar*. V sklopu projekta je bil vzpostavljen delujoč algoritem za izdelavo računske domene, vključno z vnosom poljubne geometrije preliva in razcepitvijo računske domene za vzporeden preračun. V prihodnje je predvidena verifikacija (pridobitev konvergirajoče rešitve) ter validacija numeričnega modela (umerjanje z laboratorijskimi meritvami).

## 5 UMEŠČANJE V PROSTOR

Ideja za umestitev v prostor se v prvi vrsti navezuje na prostor ob HE Brežice, saj je bila tako zastavljena projektna naloga. Obravnavane so bile različne variante ob HE Brežice, čeprav bi se za podoben objekt našle tudi druge primerne lokacije po Sloveniji. Prednost obravnavane lokacije je strateško zanimiva lega, saj je relativno blizu tako Ljubljani, Mariboru kot tudi Zagrebu, ki predstavljajo večje baze deskarjev na valovih. Poleg tega pa se v neposredni bližini nahajata tudi avtocesta in

železniška povezava, ki omogočata dobro dostopnost. Tekom izbire najprimernejše izvedbe umestitve je bilo obravnavanih osem možnih variant, od katerih so bile izbrane tri najbolj racionalne za nadaljnjo obravnavo in so tudi predstavljene v nadaljevanju. Pri vseh treh variantah bi bilo potrebno plačilo vodne pravice, in sicer vodnega dovoljenja, urediti pa bi bilo potrebno tudi lastništvo parcel, na katerih je objekt predviden. Večinoma so vse parcele v javni lasti, kar bi pospešilo postopke v primeru interesa izgradnje objekta.



Slika 7: Shematični prikaz obravnavanih umestitev (3 možne lokacije objektov – variante A, B, C)

## 5.1 UMESTITEV NA DESNO BREŽINO

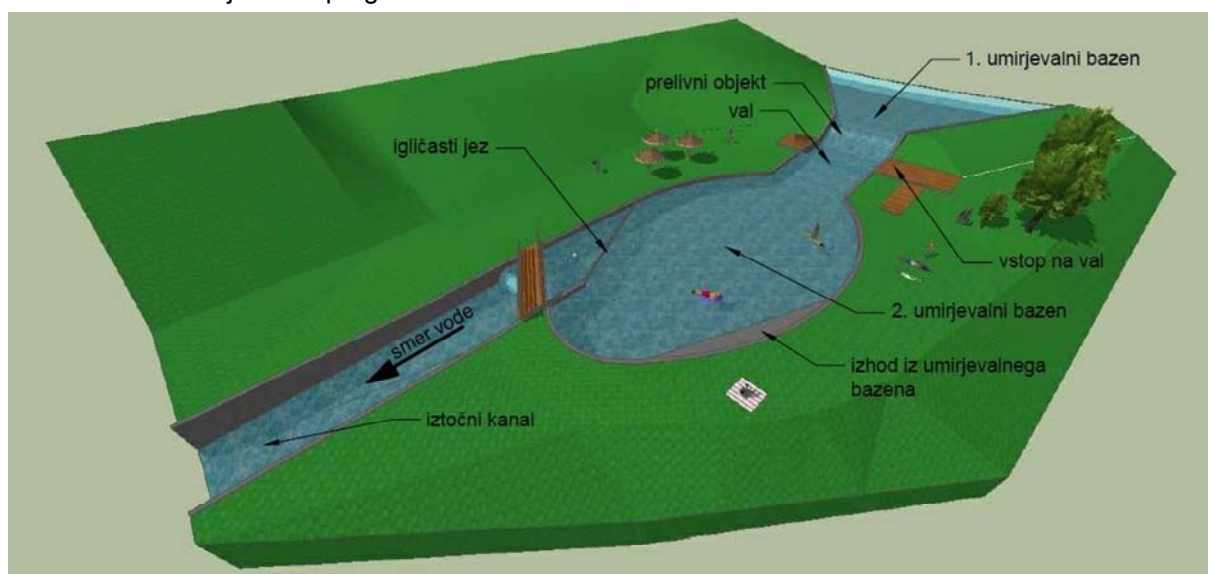
Prva obravnavana možnost je umestitev na desno brežino akumulacijskega jezera (varianta A). Dostop do objekta je predviden iz Krške vasi, kjer bi moral biti obstoječi kolovoz primerno nadgrajen, najbolje z asfaltiranjem na nivoju obstoječega terena, da ne bi ob poplavih prihajalo do zajezitve gorvodno. Zaradi zadostne višinske razlike bi bila mogoča izvedba dveh zaporednih stoječih valov. Bližina HE Brežice nam postavi omejitev, da je gibanje in kakršna koli dejavnost na nasipih 500 metrov gorvodno od HE prepovedana, zato je zajem temu primerno oddaljen od jezovne zgradbe in objekt razmeroma obsežen. Stoječa vala sta bila umeščena tik ob nasipe akumulacijskega jezera, da čim manj posegamo v razmere na poplavni ravnici. Potrebno bi bilo nekoliko spremeniti potek drenažnega kanala mimo območja stoječih valov. Dolvodno od stoječih valov je predviden sifon, ki bi vodo iz objekta speljal pod drenažnim jarkom v odvodni jarek do Save pod HE Brežice. Drenažni kanal je namreč predviden kot nadomestni habitat, in sicer kot drstišče za vodne organizme, zato pride do konflikta med osnovno funkcijo drenažnega kanala, ki naj bi čim prej odvedel vodo ter nadomestnim habitatom, kjer je zaželena senčna lega in ne prehiter tok s posameznimi zatišnimi legami. Smiselna rešitev bi bila združitev drenažnega in odvodnega kanala iz objekta v enega, vendar bi s to rešitvijo prišli v konflikt s funkcijo nadomestnega habitata. Ta varianta bi potrebovala spremembe OPN Občine Brežice, saj sta dve parceli vrednoteni kot najboljša kmetijska zemljišča. Dostop na krono nasipov in na berme bi bil glede na osnovni načrt akumulacijskega jezera neoviran. Iglčasti jezovi v dolvodnih umirjevalnih bazenih bi služili kot zaščita pred odplavitvijo uporabnikov objekta. Vsi spremljevalni objekti so za pol metra dvignjeni nad koto poplav s 100-letno povratno dobo (UL FGG, KMTe, 2012), saj je na ta način zmanjšana možnost škode.

## 5.2 UMESTITEV NA LEVO BREŽINO

Prednost izbranih umestitev na levi brežini je, da se na levem bregu reke Save načrtuje tudi kajakaška steza. Sodelovanje z načrtovalci kajakaške proge bi umestitev objekta za stoječi val olajšalo in hkrati izboljšalo ponudbo in privlačnost lokacije. Najmočnejši argument za to umestitev je dejstvo, da bi se na ta način lahko stroški odvzema vode delili z upravitelji kajakaške proge, prav tako pa bi se bolje izkoristila tudi spremljevalna infrastruktura (parkirišča, cesta, spremljevalni objekti ipd.). Pri obeh primerih umestitve v prostor so bile potrebne modifikacije terena, sistema nasipov in drenažnih kanalov, da se je zagotovila zadostna količina prostora. Vzdolžni padec terena omogoča obe ureditvi, vendar ga je treba smotrno razporediti.

Prva možnost umestitve na levi brežini je umestitev nad kajakaško progo (varianta B). Odvzem vode je predviden približno 500 m gorvodno od jezovne zgradbe, voda pa se nato zbere v prvem umirjevalnem bazenu, iz katerega priteče na objekt za surfanje. Spodnji umirjevalni bazen se deli s kajakaško progo, saj je iz istega bazena hkrati tudi začetek te proge. Prednost prve variante je bližina parkirišč in umestitev v center dogajanja ob predviden večnamenski objekt.

Druga možnost umestitve na levi brežini (izbrana varianta) je umestitev pod kajakaško progo (varianta C). Odvzem vode je enak, kot je bil načrtovan za izvedbo kajakaške proge. Objekt se umesti na kanal, ki poteka iz spodnjega (umirjevalnega) bazena kajakaške proge proti izlivu nazaj v reko Savo tik pod jezovno zgradbo. Objektu sledi umirjevalni bazen v obliki elipse, kjer imajo obiskovalci možnost izhoda iz vode. Z igličastim jezom je poskrbljeno za varnost, da uporabnika ne zanese naprej po kanalu. Iztok je prav tako zaradi varnostnih razlogov zamaknjen desno. Na točki, kjer se kanal sreča z ribjo stezo, je predviden sifon. Ker veliko razpoložljivega višinskega padca potrebuje kajakaška proga, bo objekt pod koto okoliškega terena, zato bo ob poplavnih dogodkih pod vodo. Pri poplavih s stoletno povratno dobo bi bil objekt pod gladino vode (UL FGG, KMTe, 2012), temu primerna pa mora biti tudi gradnja. Varianta je bila izbrana, ker je ekonomsko bolj opravičena od variante na desni brežini ter je varnejša od variante nad kajakaško progo.



Slika 8: 3D model objekta za surfanje na stoječem valu – umestitev na levi brežini pod kajakaško stezo

Pri dimenzioniranju objekta je bil del pozornosti posvečen tudi zagotovitvi varne uporabe takšnega objekta, saj je zagotavljanje varnosti pri športnih objektih zelo pomemben dejavnik. Iz analize že obstoječih podobnih primerov rečnega surfanja v tujini je bilo ugotovljeno, da je povprečen čas surfanja izkušenih deskarjev na takem valu okoli ene minute, na enostavnejših pa je malce daljši. To pomeni, da je padec v vodo ob zaključku neizbežen, pri začetnikih pa se padec zgodi še nekoliko prej. Predlagana izvedba objekta v idejni zasnovi je dimenzionirana tako, da stoječi val nastane pri poglobitvi dna podslapja preliva. S tem smo zagotovili nastanek primernega vala za surfanje brez drugih objektov v območju nastanka vala. Dovolj visoka plast vode nad pragom poglobitve tako že sama omogoča varen padec deskarja. Po padcu tok vode deskarja odnese dolvodno v umirjevalni bazen. Umirjevalni bazen z mirnim tokom vode in predlaganimi lestvami oziroma stopnicami ob robu

bazena omogoča varen izstop deskarja iz vode. Morebitno nevarnost za poškodbe ob uporabi objekta predstavljata obe robni betonski steni ob kanalu. Predlagana je bila zaščita območja v dolžini med 6 in 8 m, pri čemer bi se točna lokacija umestitve določila po natančnejših preizkusih na modelu v laboratoriju.

### 5.3 INVESTICIJSKA PRESOJA

Investicijska presoja objekta je bila izvedena z analizo stroškov in koristi, znotraj katere je bila najprej ocenjena vrednost posamezne investicije, nato pa so sledile še analiza variant, finančna analiza in analiza občutljivosti. Analiza variant je bila narejena za vse tri poprej obravnavane primere. S finančnega vidika sta bolj sprejemljivi varianti na levi brežini, saj prinašata manj tveganj.

Vrednost posamezne variante je bila ocenjena na podlagi projektne dokumentacije, ki je služila za sestavo popisa gradbenih del za izvedbo posamezne variante in oceno njihovih vrednosti. Gradbenim delom so bile dodane še vrednosti priprave projekta, projektantskega nadzora in nepredvidenih del, na podlagi česar je bila izdelana ocena celotne višine investicije, kot je razvidno v preglednici 2.

Preglednica 2: Višina gradbenih del in celotna višina investicije za posamezno varianto.

<b>Varianta:</b>	<b>Gradbena dela</b>	<b>Celotna višina investicije</b>
Varianta A »Na desni brežini«	538.000 €	615.000 €
Varianta B »Nad kajakaško proggo«	113.000 €	129.000 €
Varianta C »Pod kajakaško proggo«	106.000 €	120.000 €

V sklopu finančne analize je bila izvedena presoja posamezne investicije z vidika finančnih kazalnikov: neto sedanje vrednosti (NSV) in interne stopnje donosnosti (ISD). Ob tem so bile upoštevane naslednje predpostavke:

- Prihodki so izračunani na podlagi predvidenega obsega poslovanja za ekonomsko dobo projekta 1 leto (gradnja) + 25 let (obratovanje).
- Diskontna stopnja 5 % in stopnja inflacije 2 %.
- Število predvidenih uporabnikov in čas obratovanja objekta: Za varianti na levi brežini je bilo predpostavljeno 10 uporabnikov v eni uri in čas obratovanja 5 ur dnevno. Za varianto na desni brežini je prav tako predpostavljeno 5 ur obratovanja na dan, vendar 15 uporabnikov na uro. Sezono smo omejili na 120 dni na leto, tako na letni ravni za varianti na levi brežini nanese 6.000 uporabnikov in 9.000 uporabnikov na desni brežini.
- Za obratovanje objekta potrebujemo pretok vode  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , ki jo od koncesionarja odkupujemo po ceni 170 €/h.

Na podlagi vseh zgoraj navedenih vhodnih podatkov in pod pogojem pozitivne NSV objekta ob izteku ekonomske dobe je bilo možno določiti potrebno višino vstopnine na uporabnika za uro surfanja na valu. Ugotovljeno je bilo, da je točka obračanja med finančno opravičljivim in neopravičljivim projektom pri višini vstopnine za uporabo objekta na posameznika med 18,00 €/uro in 20,00 €/uro.

Na podlagi analize občutljivosti, ki je bila prav tako izvedena za vse tri predlagane variante, se kot najbolj kritična spremenljivka izkaže odkupna cena vode, saj predstavlja večino vseh stroškov. Na tem mestu je smiselno dodati, da so bile v finančni analizi uporabljene razmeroma rigorozne predpostavke - dejanski finančni prispevek je glede na stopnjo sodelovanja udeležencev pri načrtovanju lahko tudi prijaznejši do končnih uporabnikov.



## 6 ZAKLJUČKI

Surfanje oziroma deskanje na valovih ima v svetu bogato in dolgo zgodovino, v zadnjih letih pa je mogoče zaznati še dodaten razmah surf kulture. Kljub temu, da se Slovenija nahaja daleč od morskih valov, primernih za surfanje, se je surf kultura razvila tudi pri nas. Trenutno v Sloveniji delujeta dva kluba, ki svoje tečaje deskanja na valovih izvajata v tujini. Opravljene raziskave omogočajo izgradnjo ustreznih ureditev na slovenskih vodotokih, pri umestitvi objekta ob HE Brežice pa je treba smiselno upoštevati tudi hrvaško zaledje uporabnikov. Po svetu se inženirji in surferski navdušenci združujejo v iskanju rešitve, kako pridobiti stalni val, ki bi bil neodvisen od vremenskih pogojev ter bi omogočal uporabljanje v razpoložljivem lokalnem okolju. Tak tip vala bi bolj izkušenim deskarjem na vodi omogočal odlično cenejšo alternativo treninga, začetnikom pa možnost, da prve zavoje na deski opravijo na varnem športnem objektu z nadzorovanimi pogoji obratovanja. Takšen val pa ni zanimiv zgolj za surfanje, ampak tudi za druge športe, na primer za kajakaše, ki se ukvarjajo s prostim slogom. Zaključki projekta so potrdili smotrnost izvedbe tovrstnega objekta v sklopu športnih površin ob HE Brežice. Z objektom bi obogatili lokalno turistično ponudbo z novo obliko turizma. Med raziskavo je bilo ugotovljeno, da je takšen projekt izvedljiv in bi pozitivno vplival na razvoj turistične ponudbe v Sloveniji in regiji, zato bi bilo z delom smiselno nadaljevati. Zaradi prevelikega vpliva ostenja pa nadaljevanje raziskav v laboratoriju na obstoječem modelu ni več smiselno. Delo bi bilo potrebno nadaljevati na modelu v večjem merilu, najbolje na prototipu, saj bi tako pred uporabo opravili tudi atestiranje.

## 7 LITERATURA

- Chanson H., Current knowledge in hydraulic jumps and related phenomena. A survey of experimental results, *European Journal of Mwechanics B/Fluids* 28, p. 191 – 210, 2009.
- Chanson H., *The Hydraulic of Open Channel Flow*, Poglavlje 14: Physical modelling of hydraulic, 1999.
- Clauset A., Shalizi R. C., Newman M. E. J., Power – law distributions in empirical data, 2009. Dosegljivo na spletnem naslovu: <http://arxiv.org/abs/0706.1062>. Pridobljeno: 31. 2. 2014.
- Ehrenwirth, M. Parameter study of a hydraulic jump for surfing on river by means of a two-phase-flow-model with OpenFOAM. Magistrsko delo. Ingolstadt University of Applied Sciences, November 2013.
- Hirt, C.W.; Nichols, B.D. (1981), Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics* 39 (1): 201–225.
- Krogstad H. E., TMA 4195 Mathematical Modeling, Part 1: Dimensional Analysis, Scaling, and Regular Perturbation, NTNU, Autumn 2011.
- Menter, F. R. (1994), Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, *AIAA Journal*, vol. 32, no 8. pp. 1598-1605.
- Reidar Boe Olsen, N. Spillway tutorial (online). Dostopno na: <https://www.hpc.ntnu.no/display/hpc/OpenFOAM+-+Spillway+Tutorial>. Pridobljeno: oktober 2014.
- UL FGG, KMTe. 2012. Strokovna dokumentacija k Okoljskemu poročilu s področja voda za oceno vpliva gradnje in obratovanja HE Brežice in HE Mokrice na odtočni režim reke Save v mejnem profilu z Republiko Hrvaško. Ljubljana. Naročnik: HESS d.o.o.: 54 str.
- Več avtorjev. OpenFOAM 2.3.0 User guide (online). Dostopno na: <http://www.openfoam.org/docs/user/tutorials.php>. Pridobljeno: oktober 2014.