

Primljen / Received: 13.7.2017.

Ispravljen / Corrected: 2.10.2017.

Prihvaćen / Accepted: 16.3.2018.

Dostupno online / Available online: 10.5.2018.

Ispitivanje učinkovitosti i ocjena hidroelektrane s dvojnim rotirajućim hidroenergetskim pužnim sustavom

Autori:



^{1,2}Petr Lichtneger, dipl.ing.građ.
Petr.Lichtneger@boku.ac.at



²Doc.dr.sc. Christine Sindelar, dipl.ing.građ.
Sindelar@boku.ac.at



²Helmut Habersack, dipl.ing.građ.
Helmut.Habersack@boku.ac.at



³Bernhard Zeiringer, dipl.ing.građ.
Bernhard.Zeiringer@boku.ac.at



⁴Mr.sc. Christian Lechner, dipl.ing.građ.
Christian.Lechner@verbund.com



⁵Mr.sc. Gernot Mayer, dipl.ing.građ.
Gernot.Mayer@hydroconnect.at



⁵Mr.sc. Nino Struska, dipl.ing.građ.
Nino.Struska@hydroconnect.at



⁵Mr.sc. Walter Albrecht, dipl.ing.građ.
albrecht.walter@hydroconnect.at

¹CD-Laboratorij za istraživanja i upravljanje u području sedimentacije, Beč, Austrija

²Institut za vodno gospodarstvo, hidrologiju i hidrotehniku, Sveučilište za prirodne resurse i biologiju, Beč, Austrija

³Institut za hidrobiologiju i upravljanje hidroekološkim sustavima, Sveučilište za prirodne resurse i biologiju, Beč, Austrija

⁴VERBUND Hydro Power GmbH, Beč, Austrija

⁵Hydro-Connect GmbH, Ybbsitz, Austrija

Stručni rad

[Petr Lichtneger](#), [Christine Sindelar](#), [Helmut Habersack](#), [Bernhard Zeiringer](#), [Christian Lechner](#), [Gernot Mayer](#), [Nino Struska](#), [Walter Albrecht](#)

Ispitivanje učinkovitosti i ocjena hidroelektrane s dvojnim rotirajućim hidroenergetskim pužnim sustavom

Novorazvijeni koncept Arhimedovog dvostrukog hidroenergetskog pužnog sustava u jednom uređaju objedinjuje proizvodnju električne energije i dvosmjerni sustav za prolazak riba. Na prvom komercijalnom projektu provedena su ispitivanja učinkovitosti kako bi se provjerili podaci dobiveni tijekom projektiranja. Otprije je poznata mogućnost nizvodnog propuštanja. Međutim, u okviru ovog istraživanja dokazana je i stvarna mogućnost uzvodnog propuštanja. Također je utvrđena i hidroenergetska učinkovitost postrojenja ove vrste. Prvi je puta dokazana hidraulička učinkovitost ovog uređaja.

Ključne riječi:

niski tlak, hidroenergetski puž, uređaj za podizanje riba, hidraulička učinkovitost, propuštanje riba

Professional paper

[Petr Lichtneger](#), [Christine Sindelar](#), [Helmut Habersack](#), [Bernhard Zeiringer](#), [Christian Lechner](#), [Gernot Mayer](#), [Nino Struska](#), [Walter Albrecht](#)

Performance tests and evaluation of hydropower plant with double rotating hydropower screw system

The newly developed Archimedean double screw hydropower concept combines hydroelectric power generation and bi-directional fish passage in a single device. Efficiency tests were conducted at the first commercial facility to verify the design data. The downstream migration possibilities have previously been proven. However, this study demonstrates the operational capability for upstream migration. The hydraulic efficiency of this type of power plant is also determined. This is the first time that the hydraulic performance of this type of plant has been demonstrated.

Key words:

low-head, hydropower screw, fish-lift, hydraulic efficiency, fish migration

Fachbericht

[Petr Lichtneger](#), [Christine Sindelar](#), [Helmut Habersack](#), [Bernhard Zeiringer](#), [Christian Lechner](#), [Gernot Mayer](#), [Nino Struska](#), [Walter Albrecht](#)

Untersuchung der Effizienz und Bewertung des Wasserkraftwerks mit doppelt-rotierendem Wasserkraftschneckensystem

DasneuentwickelteKonzeptdesArchimedischemdoppeltenWasserkraftschneckensystems in einer Anlage vereint die Erzeugung von elektrischer Energie und das Zweiwegesystem für den Durchgang von Fischen. Beim ersten kommerziellen Projekt wurde eine Untersuchung der Effizienz durchgeführt, um die während der Planung erhaltenen Daten zu überprüfen. Von früher ist die Möglichkeit des Durchlasses stromabwärts bekannt. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde jedoch auch die tatsächliche Möglichkeit des Durchlasses stromaufwärts nachgewiesen. Darüber hinaus wurde auch eine hydroenergetische Effizienz solcher Anlagen festgestellt.

Schlüsselwörter:

niedriger Druck, hydroenergetische Schnecke, Fish-Lift, hydraulische Effizienz, Durchlass der Fische

1. Uvod

Hydroenergetska pužna turbina u tehnološkom se smislu temelji na obrnutom principu rada stare Arhimedove crpke. U novije se vrijeme ova tehnologija sve više koristi za male hidroelektrane s niskim potencijalom. Arhimedovu pužnu turbinu patentirao je 1991. godine Karl-August Radlik [3], a prva su ispitivanja provedena u razdoblju od 1995. do 1997. pod vodstvom Karela Brada na Sveučilištu tehničkih znanosti u Pragu. Od tada je diljem svijeta izgrađeno na stotine takvih pogona [5-7]. Što se tiče uvjeta niskog potencijala, pužne se turbine odlikuju brojnim prednostima kao što su visok stupanj učinkovitosti, robusna izvedba te niski troškovi ulaganja i održavanja. Osim toga, hidroenergetski pužni uređaj s niskom frekvencijom okretanja, te stoga s neznatnim silama uvjetovanima posmikom ili promjenom potencijala, omogućuje ribljoj populaciji nizvodnu migraciju uz vrlo nizak stupanj (ili bez) rizika od ozljeđivanja riba [8,9].

Koncept dvojnog pužnog pogona koji je nedavno razvila austrijska tvrtka Hydroconnect [10] u jednom uređaju objedinjuje proizvodnju električne energije i dvosmjerni sustav za propuštanje riba. Takvo je rješenje u skladu s osnovnim zahtjevima o prohodnosti poprečnih građevina na rijekama koji su definirani u Okvirnoj direktivi o vodama Europske unije [11]. Prototip je instaliran na lokaciji glavnog uređa tvrtke Hydroconnect, a prvo komercijalno postrojenje te tvrtke smješteno je na rijeci Sulm, na mjestu utoka rijeka Sulm i Mure u blizini mjesta Retznei u Austriji. Projekt je dovršen

2015. godine [12]. Dvojni rotirajući pužni uređaj projektiran je za bruto potencijal od 5,5 m te za protok od 380 l/s za nizvodnu, tj. potamalnu migraciju riba. Dominantna riblja vrsta je štika dužine od oko 90 cm. Hidroelektrana Retznei sastoji se od preljeva s preklopnom zapornicom s ukrućenjem u obliku ribljeg trbuha, zatim od primarne protočne hidroelektrane s Kaplanovom turbinom, te od nove hidroelektrane s ribljom stazom koja uključuje i Hydroconnectov pužni pogon (slika 1.), [13]. Kako bi se provjerili podaci iz projekta, provedeno je mjerenje kretanja riba [1] i testiranje hidrauličke učinkovitosti. Iako je već otprije poznata mogućnost nizvodnog propuštanja riba, monitoring proveden na ispitnoj lokaciji pokazao je da je uzvodno propuštanje riba također moguće i provedivo u praksi. Većina ribljih vrsta raznih dobnih skupina uspješno su migrirale u uzvodnom smjeru. Što se tiče hidrauličke učinkovitosti, prvi je puta ta učinkovitost potvrđena na ovoj vrsti energetske postrojenja u uvjetima normalnog rada elektrane. U radu se naglasak stavlja na tehnologiju pužnog pogona s dvojnim rotiranjem i na potrebne hidroenergetske uvjete.

2. Koncept podizanja riba pomoću dvojnog rotirajućeg pužnog uređaja

Hydroconnectov pužni uređaj objedinjuje rad pužne turbine i pužne crpke tako da se oba postupka provode istovremeno. Valjkasti rotor sastoji se od unutarnjeg cjevastog puža u ravnini crpke te od kraćeg vanjskog cjevastog puža u ravnini turbine (slika 2. lijevo). Tako je čitav rotor zapravo cilindar bez zazora

koji je fiksiran pomoću jednog aksijalnog ležaja u blizini generatora, te ležaja s dvojnim remenom koji preuzima radijalne sile. Gumeno brtvilo postavljeno je na mjesto ulaza vode u turbinu. Unutarnja cijev funkcionira kao integrirani uređaj za podizanje riba te ribe podiže u "vodni džep" unutarnjeg puža. Nakon što stigne do gornjeg kraja cijevi, riba uranja u gornju vodu ili ulazi u žlijeb koji je udaljava od ulaza u turbinu. Ulazak ribe u cijev za podizanje na razini donje vode prikazan je na slici 2. desno. Iako je u unutarnjoj cijevi predviđena samo jedna lopatica, puž se u donjem dijelu udvostručuje. Tako se višak vode koji prolazi kroz dvojni vijak vraća natrag nizvodno od cijevi, čime se dobiva dodatni bočni atraktivni tok za prolazak riba.

3. Tehničke karakteristike

Hidroelektrana Retznei dodatno je opremljena uređajem s dvojnim rotacijskim pužem na lijevoj strani koji omogućuje prolazak riba i



Slika 1. Pogled na branu Retznei s prvobitnom hidroelektričnom centralom (lijeva fotografija) i na novu hidroelektranu s cjevastim dvojnim rotirajućim pužnim pogonom na lijevoj obali (desna fotografija)



Slika 2. Prikaz demonstracijskog modela dvojnog rotacijskog puža s podiznim uređajem za ribe (lijevo) i fotografija ribe koja ulazi u cijev na razini donje vode (desno) [10]

makrozoobentoskih organizama. U vezi s time, svakako je važno upozoriti na tehnička i ekonomska pitanja kao što su djelotvornost, učestalost radnji održavanja i stopu amortizacije. Osnovni geometrijski i operativni parametri novog energetskeg postrojenja Retznei prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Osnovni parametri nove hidroelektrane

Parametar	Vrijednost	J.M.
Promjer unutarnje cijevi	1220	mm
Promjer vanjske cijevi	1800	mm
Nominalna bruto visina	5,5	m
Nagib	30	°
Broj lopatica u pužnom uređaju – crpka	1 2 (na ulazu)	-
Broj lopatica u pužnom uređaju – turbina	3	-
Koeficijent zakošenosti puža crpke	1,08	-
Koeficijent zakošenosti puža turbine	1,10	-
Raspon brzina	0 – 20	rpm
Raspon protoka	0 – 550	l/s
Nominalna električna energija	15	kW
Neto visina tijekom mjerenja apsolutne djelotvornosti	5,13 – 5,16	m

Ukupna djelotvornost turbine može se izračunati kako slijedi:

$$\eta = \frac{P_{gen}}{\rho g H (Q_t - Q_p)} \quad (1)$$

U jednadžbi (1), Q_t je protok na izlazu iz turbine, Q_p je protok na izlazu iz crpke, izraz $\rho g H$ je neto specifična hidraulička energija, a P_{gen} je količina generirane električne energije. Voda koja izlazi iz crpke cirkulira unutar sustava i može se ponovo koristiti za proizvodnju energije, čime se djelomično kompenzira energija utrošena na crpljenje. U nazivniku se stoga mijenja dostupna hidraulička energija P_h . Uvođenjem okretnog momenta T i brzine rotaciju n u okretajima u minuti, mehanička energija P_m može se izračunati kako slijedi:

$$P_m = \frac{2\pi n T}{60} \quad (2)$$

Vrijednosti hidrauličke i mehaničke energije, η_h i η_m , mogu se izračunati kako slijedi:

$$\eta_h = \frac{P_m}{P_h} \quad (3)$$

$$\eta_m = \frac{P_{gen}}{P_m} \quad (4)$$

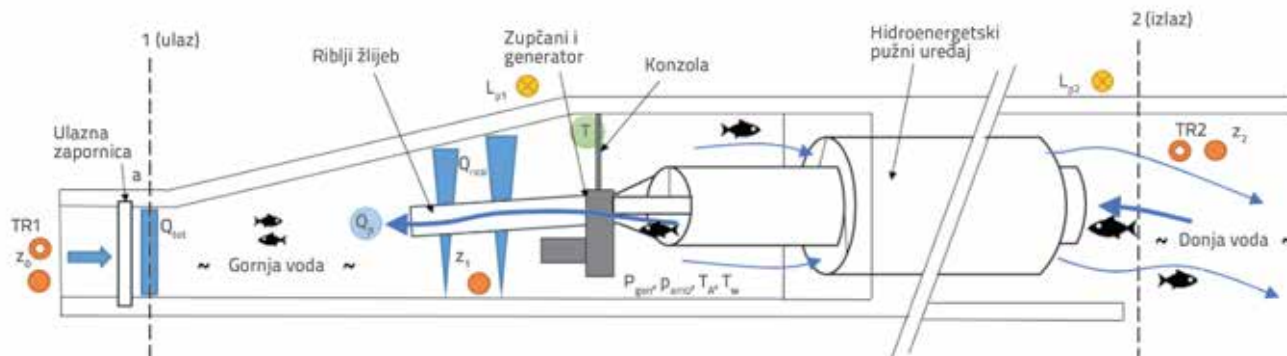
Brzina rada turbine može se mijenjati, pa se stoga može i kontrolirati izlazni protok. Na hidroelektrani Retznei korišten je Siemensov generator s mogućnošću podešavanja brzine (tip 1PH8133) te mjenjačka kutija Siemens Flender (tip H3HH506). Regulacijska zapornica instalirana je na početku ulaznog kanala kako bi se omogućilo zatvaranje vode na ulazu.

4. Terenska ispitivanja hidrauličke učinkovitosti

Ovo ispitivanje provedeno je kako bi se odredila hidraulička djelotvornost (η) hidroelektrane s dvojnim pužnim uređajem. Podešeni akustični senzori korišteni su za mjerenje razine gornje vode (z_0) uzvodno od ulazne zapornice, razine gornje vode (z_1) na uljevu iza ulazne zapornice, te razine donje vode (z_2). Brzina (n) je izmjerena induktivnim senzorom s prekidačem pomoću magneta pričvršćenih za rotor. Električna energija (P_{gen}) očitana je na izlazu iz generatora. Otvor (a) ulazne zapornice izmjeren je ručno. Osim toga, na prikladnim mjestima mjerena je razina buke u strojarnici (L_{p1}) i na izlazu (L_{p2}), vrtloženje vode na ulazu (TR1) i izlazu (TR2), temperature zraka i vode (T_a , T_w) i vrijednost tlaka okoline (p_{amb}). Dodatno je izmjeren i okretni moment, a za to su korišteni akustični tenzometri zalijepljeni na istak i na veznu šipku koja nosi generator. Na slici 3. iskazan je pregled svih izmjerenih varijabli. Dodatni podaci dostupni su u radu [2].

4.1. Otjecanje

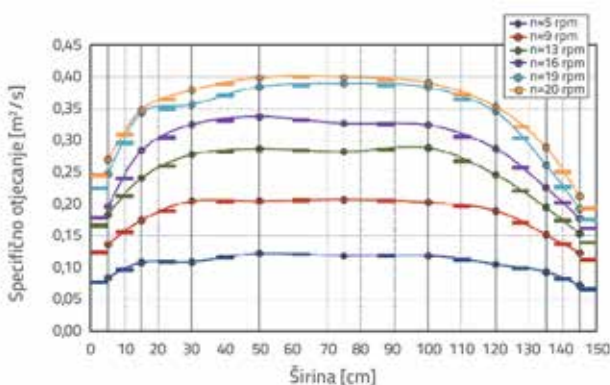
Ukupno otjecanje (Q_{tot}) izmjereno je hidrometrijski iza ulazne zapornice, koja je bila potpuno otvorena. Primijenjena je



Slika 3. Shematski prikaz postrojenja s osnovnim dijelovima (označeni su izmjereni parametri)

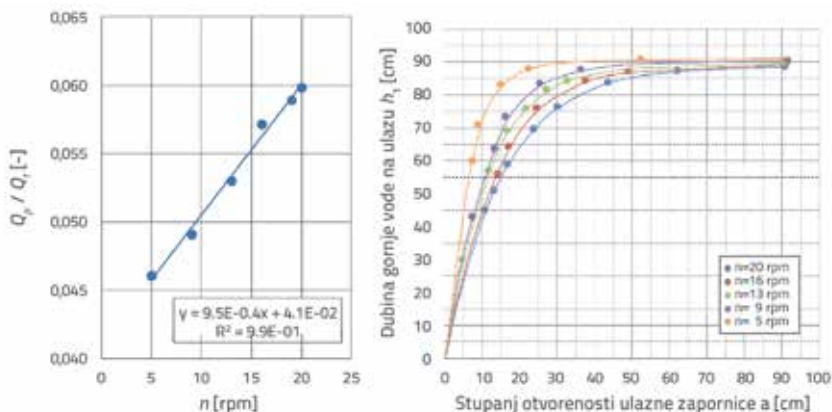
apsolutna integracijska metoda prema ISO 748 [14], a samo mjerenje je izvršeno pomoću akustičnog Dopplerovog velocimetra tipa "Flow-Tracker" (mjerič protoka) kojeg je proizveo SonTec. Flow-Tracker je postavljen na automatski vertikalni nosač s kontrolom brzine i putanje, tako da je srednja brzina toka (u_m) na jednoj vertikalnoj liniji ravnomjerno integrirana na $h_m = 82$ cm u vremenu od 117 sekundi (brzina: 0,7 cm/s) s početkom na visini od $h_b = 3$ cm iznad korita i završetkom na $h_s = 2,5-4$ cm ispod površine vode (ovisno o trenutačnoj razini vode), i obrnuto. Brzina prolazaka nije utjecala na akustični princip mjerenja.

Specifično otjecanje (q , [m²/s]) izmjereno je na devet vertikalnih profila i te je zatim provedena integracija po čitavoj širini (1,5 m) primjenom trapeznog pravila. U svakoj je vertikali izvršena korekcija u skladu s normom ISO za područja uz korito i na površini vode, gdje mjerenja nisu obavljena. Srednje specifično otjecanje u zoni između zida i sljedeće vertikale izračunano je pomoću metode raspodjele brzine po zidu. Sve su metode provedene u skladu sa sugestijama iz dokumenta IEC41 [15]. Preciznost uređaja Flow-Tracker također je kontrolirana u baždarnom koritu tijekom baždarnih mjerenja pomoću uređaja LDA (laserska Dopplerova anemometrija) te kroz simulaciju prirodnog vrtložnog i zamućenog toka u hidrauličkom laboratoriju BOKU-a. Konačna raspodjela izlaznog toka po širini ulaznog kanala prikazana je na slici 4. za šest stalno aktivnih točaka. Krugovi predstavljaju izmjerene vrijednosti specifičnog otjecanja; kratke horizontalne linije su srednje vrijednosti između mjernih vertikala i zida



Slika 4. Rezultati integracijske metode za mjerenje otjecanja

Otjecanje crpljenjem (Q_p) izmjereno je pomoću volumetrijske metode prema normi ISO 8316 [16]. Za to je korišten otvoreni spremnik kapaciteta 507 litara (obujam spremnika precizno je određen u našem hidrauličkom laboratoriju). Spremnik je brzo postavljen na uzvodni kraj korita riblje staze pod mlaz vode. Vrijeme punjenja spremnika izmjereno je štopericom.



Slika 5. Omjer protoka crpke i turbine u odnosu na brzinu rotiranja (lijevo), te dubina gornje vode na ulazu u odnosu na stupanj otvorenosti ulazne zapornice (desno)

Mjerenje je ponavljano nekoliko puta pri raznim brzinama rotacije. Tijekom mjerenja zaustavljen je protok vode iz turbine (zatvorena je ulazna zapornica) a radno kolo je pokretano motorom (s negativnom snagom generatora). Rezultati ovisni o brzini bili su u velikoj mjeri podudarni s polinomnom funkcijom drugog reda [2]. Dakle, otjecanje iz turbine $Q_t = Q_{tot} + Q_p$ te omjer između otjecanja iz pumpe i iz turbine Q_p / Q_t može se odrediti u odnosu na brzinu (n) za izmjerene operativne točke, kako je to prikazano na slici 5., lijevo. Omjer nije bio konstantan, tj. varirao je od 4,5 do 6 % u operativnom području. Utjecaj razine donje vode na učinak crpljenja može se zanemariti jer su te fluktuacije zadržane u intervalu od 9 cm, a ulazni presjek unutarnjeg crpnog puža u potpunosti je bio uronjen za vrijeme svih mjerenja.

Zbog ograničenog prostora na ulazu, apsolutno mjerenje ukupnog otjecanja realno bi se moglo provoditi samo kada je ulazna zapornica potpuno otvorena. Relativno mjerenje provedeno je za djelomično otvorenu zapornicu pomoću dvije akustične bočno usmjerene Dopplerove sonde (SLD) koje je proizvela tvrtka OTT-Hydromet. One su postavljene na različitim visinama i na različitim poprečnim presjecima kako bi se što bolje riješila raspodjela protoka za nekoliko uvjeta toka. Sondama su dobivene srednje vrijednosti brzine u horizontalnim segmentima po širini poprečnog presjeka. Relativno mjerenje baždareno je pomoću ukupnih vrijednosti otjecanja dobivenih na temelju apsolutnih hidrometrijskih mjerenja. Ulazna je zapornica korištena za spuštanje razine gornje vode na ulazu u turbinu. Zbog manjeg stupnja otvorenosti ulazne zapornice na operativnim točkama manjih dubina na ulazu, otjecanje iz turbine određeno je u odnosu na relativnu dubinu staza akustičnog mjerenja i logaritamske raspodjele brzina. Točnost procjene bila je mnogo niža od točnosti koja je postignuta apsolutnim mjerenjima jer su na podatke o brzini dobivene uređajem SLD utjecale velike fluktuacije u vremenu mjerenja, koje je uvijek iznosilo otprilike pet minuta. Ipak, rezultati su bili kompatibilni te su omogućili procjenu djelotvornosti za manje dubine vode u ulaznom dijelu. Kako crpljenje nije ovisilo o razini vode, odnos Q_p / Q_t povećavao se sa stupnjem zatvorenosti ulazne zapornice. Odnos između dubine u ulaznom kanalu (h_i)

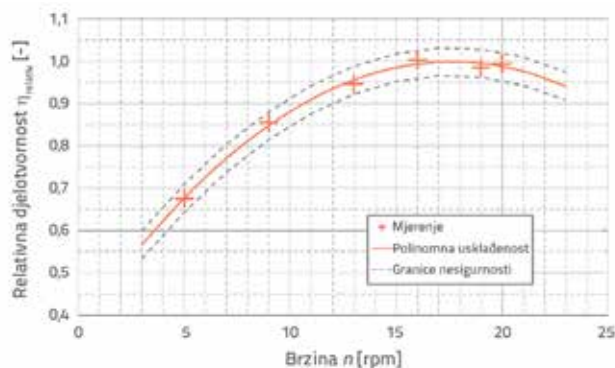
i stupnja otvorenosti ulazne zapornice prikazan je na slici 5. desno, za nekoliko brzina turbine.

4.2. Potencijal

Neto potencijal je najprije izračunan između poprečnih presjeka 1 i 2 (slika 3.) za slučaj apsolutnih mjerenja otjecanja, a vrijednosti su varirale od 5,13 do 5,16 m. Zatim je neto potencijal izračunan pomoću sonde SLD1 između poprečnog presjeka i presjeka 2 za slučaj niske razine vode na ulazu (relativna mjerenja) i dobivene su vrijednosti u rasponu od 4,60 do 5,18 m. Nominalni bruto potencijal od 5,5 m nije bio dostupan tijekom mjerenja zbog visoke razine donje vode u rijeci Muri.

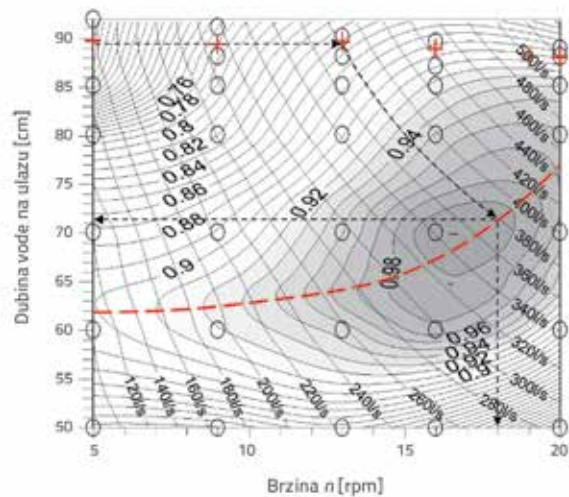
4.3. Djelotvornost

Precizna mjerenja djelotvornosti provedena su primjenom metoda za mjerenje apsolutnog otjecanja za slučaj potpuno otvorene ulazne zapornice pri šest različitih brzina turbine. Procijenjeno je da apsolutna sustavna nesigurnost u mjerenju djelotvornosti iznosi $\pm 1,8\%$ (pri razini statističke pouzdanosti od 95 %) prema dokumentima IEC 41 i IEC 62006 [15, 17]. Vrijednosti djelotvornosti normalizirane su pomoću lokalnog maksimuma (η_{max}), a označene su kao relativna djelotvornost: $\eta_{rel} = \eta / \eta_{max}$. Krivulja normaliziranih vrijednosti djelotvornosti s odgovarajućim rasponom nesigurnosti prikazana je na slici 6. na bazi apsolutnih mjerenja otjecanja. Djelotvornost je iskazana u odnosu na brzinu, koja je bila neovisna varijabla u ispitivanju. Nije provedena konverzija u zadani (nominalni) potencijal.



Slika 6. Krivulja relativne djelotvornosti određena na temelju apsolutnih hidrometrijskih mjerenja ukupnog otjecanja u slučaju potpuno otvorene ulazne zapornice te uz normalizaciju s maksimumom. Potencijal od otprilike 5,15 m uglavnom je bio konstantan

Ovisnost otjecanja, električne energije, potencijala i dubine vode na ulazu o stupnju otvorenosti ulazne zapornice i brzini, određena je na temelju mjerenja pri nižim razinama vode na ulazu. Na temelju dobivenih rezultata izračunane su razine djelotvornosti za pravilan raspon brzina (5 – 20 okretaja u minuti) i dubina vode (50 – 90 cm), što je normalizirano s maksimumom globalne djelotvornosti te iskazano u vidu Hillovog dijagrama, kao što se to vidi na slici 7.



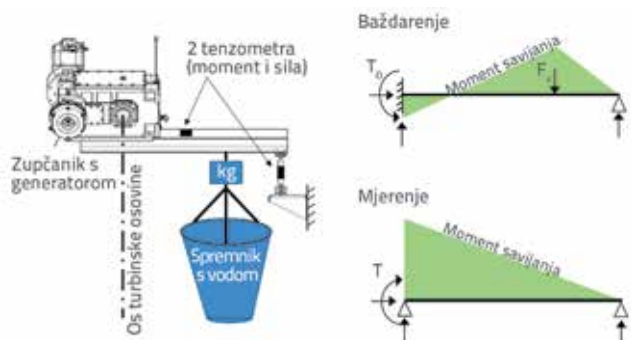
Slika 7. Hillov dijagram s vrijednostima relativne djelotvornosti $\eta_{rel} [-] = \eta / \eta_{max}$ i ukupnog otjecanja Q_{tot} [l/s]. Izvorni su podaci označeni krugovima, a točke bazirane na apsolutnim hidrometrijskim mjerenjima označene su križićima

Crvena crtkana linija na Hillovom dijagramu (slika 7.) prikazuje optimalni odnos između dubine na ulazu i brzine turbine. Očito je da uobičajene razine vode na ulazu (potpuno otvorena ulazna zapornica, $h_1 \cong 90$ cm) dovode do pretjeranog punjenja pužnog uređaja te do smanjenja djelotvornosti. Odgovarajuće smanjenje razine vode na ulazu ili podizanje ulaza pužnog uređaja (pomicanjem donjeg dijela prema gore) dovelo bi do smanjenja dubine na ulazu te do povećanja djelotvornosti. Na primjer, smanjivanjem dubine vode na ulazu s otprilike 90 centimetara na otprilike 71 centimetar, te povećavanjem brzine s 13 na 18 okretaja u minuti (vidi kratke crne crtkane strelice) dovodi do povećanja djelotvornosti s faktorom od otprilike 1,17, pri čemu se zadržava razina protoka i snage (usporedi energetske dijagram iskazan na slici 10.). Kao optimalno operativno rješenje može se prihvatiti raspon dubine vode od 66 do 72 centimetra te raspon brzina od 16 do 18 okretaja u minuti. Ipak, treba znati da je Hillov dijagram baziran na podacima koji su dobiveni relativnim mjerenjima otjecanja a, osim toga, to je mjerenje određeno korištenjem dvodimenzionalne polinomne interpolacijske funkcije drugog reda, što je dovelo do dodatne aproksimacije određenih podatkovnih točaka. Zbog toga nesigurnost ovog podatka o djelotvornosti nije precizno određena.

4.4. Okretni moment

Sljedeći cilj ovih ispitivanja uključivao je mjerenje okretnog momenta na osovini bez konstrukcijskih izmjena, te stjecanje novih spoznaja o mehaničkom ponašanju stroja. Razvijena je i provedena relativna metoda za mjerenje okretnog momenta pomoću tenzometara. U tu su svrhu dva jednostavna tenzometra postavljena na konzolu i poteznu šipku koji nose kutiju sa zupčastim mehanizmom s motorom/generatorom,

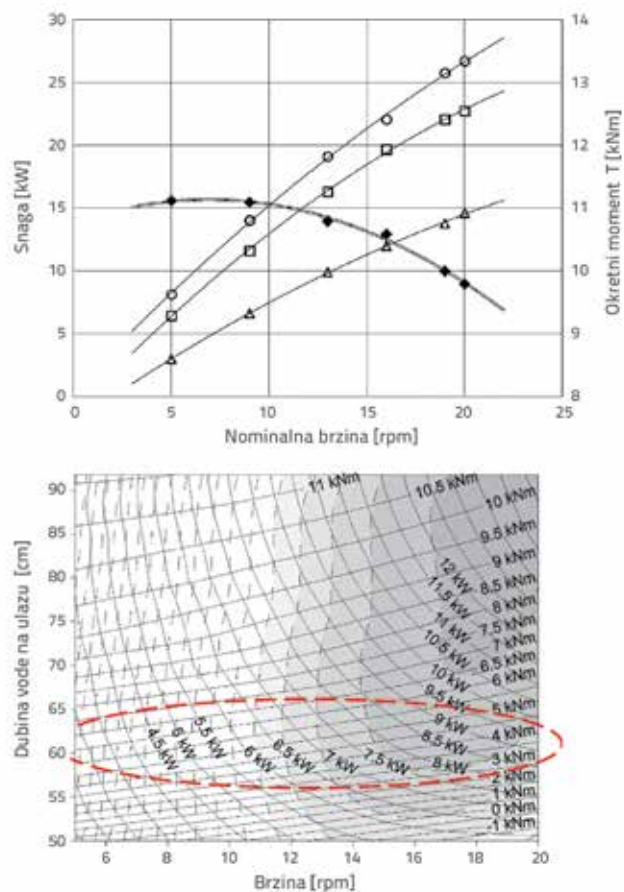
kako je prikazano na slici 8. Tenzometri su kalibrirani nanošenjem baždarnе sile F_c na konzolu (postupnim punjenjem spremnika vodom do tlaka od 5,5 kN). Kako je shema baždarnog opterećenja drugačija od radnog opterećenja, te kako je kutija sa zupčatim mehanizmom opremljena kočnicom koju se ne može isključiti tijekom baždarenja, u obzir su se trebala uzeti dva stanja opterećenja – prvo tijekom baždarenja (kočnica je uključena), a drugo tijekom mjerenja (kočnica je isključena a turbina je u pogonu). Ključni dio metode bio je preračunavanje baždarnih funkcija u mjerne funkcije. Potrebno je napomenuti da ova metoda nije standardna, te da je nepoznat početni okretni moment T_0 uvijek bio prisutan zbog preostale vode u nekim dijelovima puža, te zbog prethodnog okretnog momenta koji je bio prisutan u trenutku aktiviranja kočnice. U svakom slučaju, primjenom modela opterećivanja koji je prikazan na slici 8., početni okretni moment je donekle smanjen tako da su ipak dobiveni kompatibilni podaci o okretnom momentu za glavne operativne točke i za sva prethodno opisana mjerenja relativnog otjecanja.



Slika 8. Shema opterećenja za baždarenje i mjerenje okretnog momenta

Mehanička snaga P_m određena je primjenom podataka o okretnom momentu, a na temelju jednadžbe (2). Dijagram na slici 9. gore, prikazuje odnos između brzine s jedne strane i generatorske, mehaničke i hidrauličke snage te okretnog momenta, s druge strane. Ovaj odnos vrijedi za glavne operativne točke na kojima je mjereno apsolutno otjecanje. Pomoću jednadžbe (3) utvrđeno je da hidraulička djelotvornost varira od 80 do 90 %. Međutim, još jednom treba napomenuti da se nesigurnost ovog rezultata ipak ne može ocijeniti, i to zbog prisutnosti prvobitnog okretnog momenta čija je veličina nepoznata. Zato je na slici 9. dolje, iskazan samo Hillov nepotpuni dijagram (bez apsolutnih vrijednosti), na kojem se vidi mehanička djelotvornost izračunana iz podataka o mjerenju prema jednadžbi (4). Raspodjela okretnog momenta i generatorske snage u istraživanom rasponu brzina i dubina vode na ulazu, također je prikazana na dijagramu na slici 9. gore. Tendencija koju pokazuje mehanička djelotvornost je očita – što je veća brzina na ulaznoj dubini (te u konačnici

i otjecanje), to je veća generatorska snaga i mehanička djelotvornost. Okretni se moment povećava sa smanjenjem brzine. Kruga hidrauličke djelotvornosti gotovo je neovisna o brzini na dubini od 60 cm na ulazu, a to je na slici označeno crtkanom elipsom. Množenjem ($\eta_h \cdot \eta_m$) se dobiva Hillov dijagram djelotvornosti pogona (u odnosu na P_{gen}) s vrijednošću optimalne djelotvornosti, kao što se to vidi na slici 7.



Slika 9. Odnos brzine i hidrauličke, mehaničke i generatorske snage te okretnog momenta (lijevo) i mehanički nepotpuni Hillov dijagram s generatorskom snagom i linijama okretnog momenta (desno). Crtkana elipsa označava maksimalne hidrauličke djelotvornosti

Okretni moment (deformacija) i ostali mjerni signali dobiveni su i pohranjeni velikom brzinom (200 Hz) na računalu. Primjer mjerenja za slučaj $n = 16$ okretaja u minuti, te za postupno smanjenje dubine vode na ulazu, prikazan je na slici 10. lijevo. Na toj su slici unesene tri vertikalne linije kako bi se prikladno iskazao odnos između tenzometarskih signala i generatorske snage. Zumiranjem u krivulju (slika 10. desno) uočava se vrlo dobar odziv u vremenu. Može se zamijetiti frekvencija rotacije kod dovoda/odvoda vode pomoću puža crpke, te čak i dobra reprodukcija tri turbinska puža.



Slika 10. Vremenske krivulje mjernih signala (lijevo, nije u mjerilu) i detalj krivulje deformacijskog odziva na kojem se vidi dobra reprodukcija puževe crpke i turbine (desno)

5. Hidroenergetska ocjena prve godine kontinuiranog rada

Nakon primopredaje u prvom tromjesečju 2015., te nakon određenih ispitivanja raznom opremom, u 2016. se bilježi prva godina kontinuiranog rada pužnog mehanizma. Stoga su podaci koji slijede prikazani za razdoblje od siječnja do prosinca 2016. godine, tablica 2. Hidroelektrana Retznei sastoji se od glavne turbine (kaplanskog tipa) na desnoj obali, preljeva na sredini, te hidroenergetskog puža za migraciju ribe na lijevoj obali.

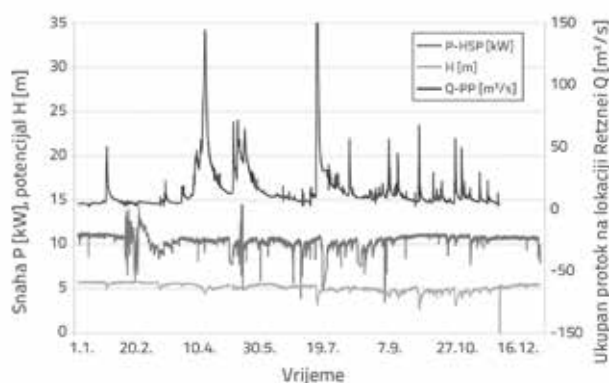
Tablica 2. Osnovni parametri za hidroelektranu Retznei (za 2016.)

Parametar	J.M.	Hidroenergetski pužni uređaj	Kaplanova turbina
Snaga W	MWh	72,93	3896,3
Srednja snaga P (FC)	kW	10,50	467,22
Srednji potencijal H	m	5,13	5,13
Kumulativna nedostupnost	h	22,5	-
Održavanje i pregled	h	160	-

Hidroenergetski puž instaliran na energetskom postrojenju Retznei isključivo je projektiran za migraciju ribe, a ne za povećanje nominalnog protoka hidroelektrane. Neizvođenje hidroenergetskog puža objašnjava se tipično velikim protocima na rijeci Sulm tijekom plavljenja. Zbog pada razine gornje vode te povećanja razine u nizvodnom dijelu, turbine se trebaju zatvarati, vidi hidrograf na slici 11.

Tvrtka Hydroconnect GmbH upravo razvija nekoliko projekata u Kanadi i srednjoj Europi. Najveći dvojni rotirajući puževi sada se planiraju za visine od otprilike 40 m. U takvim se slučajevima trebaju instalirati tri puža u seriji. Projektirani su za prenošenje riba u dužini do 1,5 m. Prvi jednostruko rotirajući

puž za migraciju riba predviđa se izgraditi u Austriji (plan, kraj 2017.). Nekoliko fotografija s lokacije prikazano je na slici 12.



Slika 11. Hidrograf pužnog uređaja s prikazom generatorske snage, potencijala i ukupnog protoka na hidroelektrani Retznei u 2016. bez kratkotrajne nedostupnosti



Slika 12. Pogled na pužni uređaj s nizvodne strane (gore lijevo), pogled na ulazni kanal koji vodi prema gornjoj vodi, ulazna zapornica je zatvorena (gore desno), ugradnja sonde SLD i mjerača vodostaja u ulaznom kanalu; shematski prikaz načina rada (dolje lijevo), te punjenje mjerne bačve vodom iz crpke na kraju ribljeg žlijeba (dolje desno)

6. Zaključak

Dvojni rotirajući pužni uređaj instaliran na hidroelektrani Retznei prvi je dvosmjerni uređaj za provođenje ribe ovakve izvedbe, tj. izvedbe koja se temelji na tehnologiji dvojnog rotirajućeg puža. Prve dvije godine rada pokazuju da sustav radi besprijekorno. Uočeno je da ribe i ostali vodni organizmi mogu migrirati kroz sustav bez nekog većeg napora. Moguće je kretanje od gornje vode prema donjoj, te također u suprotnom smjeru od donje vode prema gornjoj, bez većeg rizika od povrede [1]. Razna provedena mjerenja pokazuju da dvojni rotirajući puž nije samo uređaj koji omogućuje migraciju riba, već također i sredstvo za generiranje energije. Osim toga, ustanovljeno je da je i stupanj hidrauličke djelotvornosti izrazito dobar. Ovaj se sustav može, u odgovarajućim uvjetima, profitabilno koristiti kao malo energetske postrojenje. Kako bi se u što većoj mjeri povećala djelotvornost, važno je dvojni rotirajući puž koristiti pri optimalnoj brzini za zadani nominalni protok, te također projektirati optimalnu dubinu vode na ulazu, kao što to i pokazuju rezultati mjerenja. Rezultati mjerenja okretnog momenta upućuju na vrlo dobru hidrauličku učinkovitost

dvojnog rotirajućeg puža (uzimajući u obzir i gubitke zbog višećeg remenastog ležaja). Ta učinkovitost iznosi više od 80 %. Postoje i znatne mogućnosti poboljšanja mehaničko-električnog prijenosa. Općenito uzevši, gubici na generatoru, frekvencijskom pretvaraču, elektronicu za pokretanje i zupčastom mehanizmu prelaze 20 %, a najveći su pri niskim brzinama. Kako je pri upotrebi metode za mjerenje okretnog momenta vrijednost nesigurnosti nepoznata, trebaju se u budućnosti provesti dodatna ispitivanja kao osnova za donošenje konačnih zaključaka o odnosu između mehaničke i hidrauličke djelotvornosti.

Zahvala

Autori zahvaljuju na financijskoj pomoći koju je dodijelila agencija FFG (*Austrian Research Promotion Agency*) u okviru projekta br. 854115 Innovation-Scheck-Plus, zatim na opremi koju je ustupio BOKU – Bečki institut za biotehnologiju i grad Beč, na tehničkoj pomoći koju je pružilo Savezno ministarstvo za ekonomiju, obitelj i mladež te Austrijska zaklada za istraživanja, tehnologiju i razvoj.

LITERATURA

- [1] Zeiringer, B., Fuhrer, S., Auer, S., Struska, N., Albrecht, W.: Fish Passability *** Double Rotary Screw: A suitable Alternative to the Restoration of Patency. *Wasserwirtschaft*, 107 (2017) 2-3, pp. 33-40.
- [2] Lichtneger, P., Sindelar, C., Habersack, H., Mayer, G., Struska, N., Albrecht, W., Lechner, C.: Field Tests to Determine The Hydraulic Performance of The First Installation of The Double Rotating Hydropower Screw with Integrated Fish Lift. In: Institute for Energy Systems and Thermodynamics Research group: Fluid-Flow Machinery (Hrsg.), 19th International Seminar on Hydropower Plants., ISBN: 978-3-9504338-0-7, 2016.
- [3] Radlik, K.A.: Patent no DE 4139134A1 Wasserkraftschnecke zur Energieumwandlung, [Hydrodynamic screw for energy conversion – uses changes in water supply to regulate energy output]. (1997): Patent no DE 4139134 C2, 1992.
- [4] Brada, K., Radlik, K.A.: Water screw motor for micropower plant. 6th Intl. Symp. Heat exchange and renewable energy sources, pp. 43-52, 1996, W. Nowak, ed. Wydaw Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, Poland.
- [5] Lashofer, A., Hawle, W., Kampl, I., Kaltenberger, F., Pelikan, B.: State of technology and design guidelines for the archimedes screw turbine. In: The international Journal on Hydropower & Dams, Hydro 2012 Proceedings, Bilbao/Spain.
- [6] Stergiopoulou, A., Stergiopoulos, V.: Quo vadis Archimedean turbines nowadays in Greece, in the era of transition? *Journal of Environmental Science and Engineering*. A1, pp. 870-879, 2012.
- [7] Nuernbergk, D.M.: Wasser-kraftschnecken: Berechnung und optimaler Entwurf von archimedischen Schnecken als Wasserkraft-maschine. Detmold : Verlag Moritz Schäfer GmbH & Co. KG, pp. 256, 2012, ISBN: 978-3-87696-136-1.
- [8] Reuter, M., Kohout C.: Praxishandbuch für den umweltbewussten Einsatz von Turbinen-technologien im Bereich der Kleinstwasserkraft. Institut für Wasserwirtschaft, Siedlungswasserbau und Ökologie GmbH, 2014.
- [9] Schmalz, W.: Fischabstieg durch eine Wasserkraftschnecke an einem Ausleitungs-kraftwerk, In: *Wasserwirtschaft*, 101 (2011) 7-8, pp. 82-87.
- [10] Hydroconnect – Homepage, <http://www.hydroconnect.at/en/>
- [11] EU Water Framework Directive 2000/60/EC (2000)
- [12] Hydroconnect – Studies & Guides (2016). <http://www.hydroconnect.at/studien-leitfaeden/>
- [13] Verbund - Laufkraftwerk Retznei, <http://www.verbund.com/pp/de/laufkraftwerk/retznei> (2016)
- [14] ISO 748:2007 Hydrometry – Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats.
- [15] IEC 41:1991 Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines.
- [16] ISO 8316:1987 Measurement of liquid flow in closed conduits – Method by collection of the liquid in a volumetric tank.
- [17] IEC 62006:2010 Hydraulic machines - Acceptance tests of small hydroelectric installations.