

**PREHODNOTENIE KAPACITY BEZPEČNOSTNÝCH PRIEPADOV
VYBRANÝCH NÁDRŽÍ V SPRÁVE SVP Š.P. OZ KOŠICE POMOCOU
HYDRAULICKÉHO FYZIKÁLNEHO MODELOVANIA**

Dušan Abaffy, Marek Čomaj, Filip Rebenda, Vladimír Polák, Dušan Mydla

V Hydrotechnických laboratóriách VÚVH boli realizované viaceré výskumné úlohy prehodnotenia merných kriviek nehradených bezpečnostných priepadov vodných nádrží v správe SVP š.p. O.Z. Košice, pomocou fyzikálneho hydraulického modelovania. Príspevok je zameraný na modelový výskum nehradených bezpečnostných priepadov na VN Veľká Domaša, VN Ružín I, VN Ružín II, VN Sigord, ktorý bol realizovaný v poslednom období. Kapacita týchto objektov bola v minulosti stanovená často iba teoretickým výpočtom, resp. posúdená 1D a 2D numerickým modelom, čo sa ukázalo ako nedostatočné. Boli preukázané chyby pri návrhu objektov a v mnohých prípadoch, pri skúmaných vodných dielach, sa kapacita priepadu ukázala ako nedostatočná pre prehodnotenú návrhovú povodňovú prietoky. Reálne dochádza v odtokových žľaboch pod priepadmi k dosť zložitým pomeroch prúdenia, hlavne k zahlcovaniu a výraznému skrutkovitému pohybu vody vo vývare hate, keď dolná hladina v odtokovom žľabe pod priepadom vystúpi výrazne vyššie, no nerovnomerne po dĺžke. To spôsobuje odchýlku od výpočtov, ktoré sú realizované pomocou zjednodušených numerických modelov. Následne bolo nutné navrhnúť a otestovať vhodné konštrukčné úpravy daných priepadov, za účelom zvýšenia ich kapacity na požadovanú hodnotu.

KLÚČOVÉ SLOVÁ: bezpečnosť vodných diel, bezpečnostný priepad, povodňové prietoky, povodne, fyzikálny hydraulický model

REASSESSMENT OF SPILLWAY CAPACITY OF SELECTED WATER RESERVOIRS ADMINISTARTED BY THE SLOVAK WATER MANAGEMENT ENTERPRISE, BRANCH KOŠICE, USING HYDRAULIC PHYSICAL MODELING. The experts of the Water Research Institute Hydraulic Laboratories performed several research tasks on the reassessment of rating curves of uncontrolled spillways of water reservoirs administrated by the Slovak Water Management Enterprise, branch Košice, using physical hydraulic modeling. The paper focuses on the recent model research of uncontrolled spillways of the hydraulic structures Veľká Domaša, Ružín I, Ružín II and Sigord. In the past, the capacity of these structures was often determined only by theoretical calculation or assessed using 1D and 2D numerical model, which proved to be insufficient. The errors of structure design have been proved and in many cases of investigated hydraulic structures, the capacity of spillway has shown to be insufficient regarding the revised design flood discharges. There is a real helical motion of water in the discharge flumes under the spillways, as in the stilling pool of weir, where the lower water level below the spillway significantly increases and affects the overflow by backwater. This causes a deviation from calculations that are done using simplified numerical models. Subsequently, it was necessary to design and test appropriate construction design modifications of the given spillways in order to increase their capacity to reach the required value.

KEY WORDS: safety of hydraulic structures, spillway, flood discharges, floods, physical hydraulic model

Úvod

Výstavba vodných nádrží bola na Slovensku uskutočnená hlavne v 60. – 70. rokoch minulého storočia, s kapacitami objektov navrhnutými na vtedajšie hydrologické

pomery. Odvtedy ubehlo už cez 50 rokov, zmenili sa klimatické podmienky a prehodnotili sa návrhové povodňové prietoky. Hlavne v extrémne vodnom roku 2010 sa ukázalo, že mnohé staršie nádrže majú problémy s kapacitou bezpečnostných priepadov a prevedením

aktuálnych povodňových prietokov. Nezrovnalosti pri určovaní skutočne prevádzaného prietoku cez nehradené priepady a nedostatočný rozsah merných kriviek primáli správcu veľkých vodných nádrží zaoberať sa uvedenou problematikou podrobnejšie. Výsledkom bolo postupné zahájenie prehodnocovania kapacít jednotlivých bezpečnostných priepadov a v prípade zistených nedostatkov pri projektovaných parametroch aj hľadanie technických riešení na zvýšenie ich kapacity.

VN Veľká Domaša

Vodná nádrž Veľká Domaša bola vybudovaná v rokoch 1962 až 1967 na toku Ondava. Účelom vodnej nádrže je akumulácia vody a jej dodávka pre priemysel a závlahy, ochrana pred povodňami, výroba elektrickej energie a rekreácia. Bezpečnostný priepad je nehradený, bočný, situovaný na ľavom svahu akumulačnej nádrže. Konštrukcia sa skladá z priepadovej hrany a žľabu, ktorý v mieste križovania s korunou priehrady prechádza do sklzu, ústiaceho pod priehradou do koryta Ondavy. Odtokový žľab je dlhý 92 m, úroveň priepadovej hrany je na kóte maximálnej prevádzkovej hladiny, t.j. 162,00 m n. m.

Z pôvodnej výskumnej správy bolo zistené, že počas hydrotechnického výskumu a návrhu bezpečnostného priepadu neboli ujasnené návrhové prietoky, nakoľko sa nevedelo, akú mieru retencie dosiahne vodná nádrž počas prechodu návrhovej povodňovej vlny. Podľa posudku z r. 1960 pred hydrotechnickým návrhom sa

počítalo, že 100 ročná návrhová vlna sa v retenčnom objeme nádrže sploští z 520 m³/s na 320 m³/s. Po revízii z r. 1961 (po resp. tesne pred ukončením výskumu a návrhu bezpečnostného priepadu) sa revidovala miera sploštenia návrhovej 100 ročnej vlny z 520 m³/s na 380 m³/s, a sploštenie pre 1000 ročnú návrhovú povodňovú vlnu bolo stanovené na 430 m³/s.

Pre súčasné povodňové prietoky miera sploštenia návrhových povodňových vln predpokladá, že prietok $Q_{100} = 615$ m³/s bude transformovaný na $Q_{100TR} = 327$ m³/s pri dosiahnutí kóty hladiny 163,33 m n. m. a prietok $Q_{1000} = 930$ m³/s bude transformovaný na $Q_{1000TR} = 474$ m³/s pri dosiahnutí kóty hladiny 163,77 m n. m.

Pre preverenie kapacity bočného bezpečnostného priepadu VN Veľká Domaša bol v hydrotechnických laboratóriách VÚVH postavený fyzikálny model daného objektu v modelovej mierke 1:33 podľa Froudovej mierkovej podobnosti pre zachovanie požadovaných kritérií modelovej podobnosti. Pri modelovaní priepadov je limitná podmienka dodržania okolo 50 mm výšky prepadového lúča pre návrhový prietok, aby povrchové napätie nedeformovalo jeho tvar a neovplyvňovalo súčiniteľ prepadu. Fyzikálny model priepadu bol postavený presne podľa dodaných výkresov geodetického zamernia od SVP OZ Košice, t.j. v takom tvare, ako bol v roku 1962 počas výstavby VN Veľká Domaša zrealizovaný. Modelový bazén výseku nádrže pred bezp. priepadom bol rozmerov 2,5 x 4,0 m napojený na tlmiaci bazén s prívodom vody oddeleným perforovanou tlmiacou stenou.

Tabuľka 1. Pôvodné N-ročné prietoky z roku 1961 pre profil Trepec na Ondave

Table 1. N-year discharges in 1961 for the profile Trepec on the Ondava River

N (rok)	1	5	10	20	50	100
Q (m ³ /s)	128	280	350	410	470	520

Tabuľka 2. Aktuálny Manipulačný poriadok z r. 2008 VN Veľká Domaša udáva nasledovné povodňové prietoky na Ondave v lokalite VN Veľká Domaša s triedou spoľahlivosti II

Table 2. The current operation rules of 2008 for Veľká Domaša Water Reservoir give the following flood discharges on the Ondava River in the locality of Veľká Domaša Water Reservoir with reliability class II

N (rok)	1	5	10	20	50	100	1000
Q (m ³ /s)	134	286	357	436	543	615	930



Obr. 1. Model bezpečnostného priepadu VN Veľká Domaša a jeho merná krivka.

Fig. 1. Model of the spillway of Veľká Domaša Water Reservoir and related rating curve.

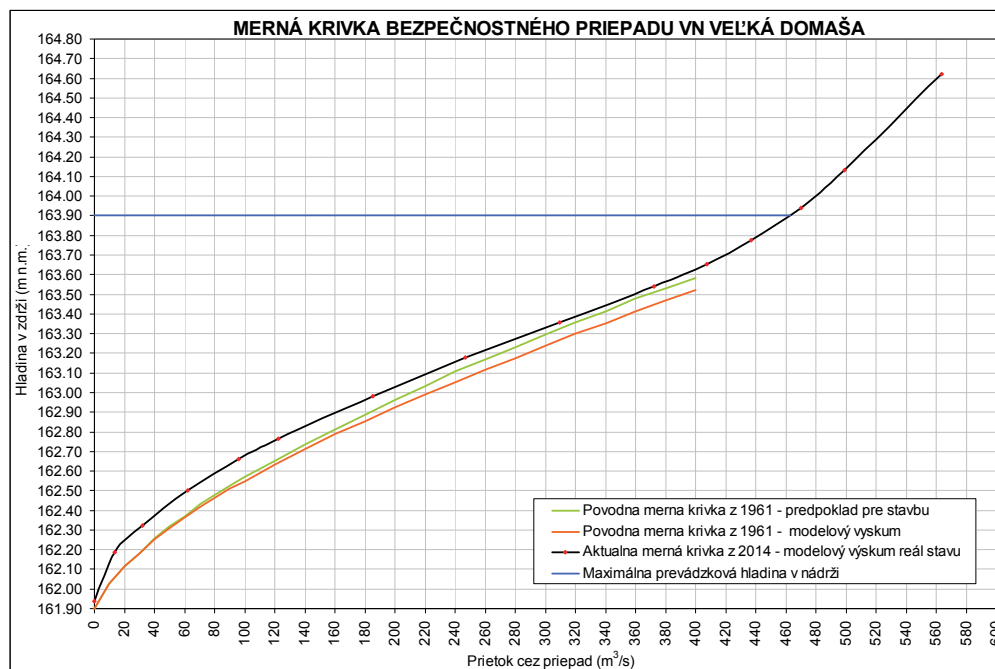
Pre presné meranie prietoku bol na prívodnom potrubí do modelového bazéna osadený kalibrovaný elektromagnetický prietokomer s presnosťou merania max odchýlky 1 %. Hladina v nádrži bola meraná presným hrotovým merítkom s čítaním po 0,1 mm osadený v sklenenom hrnci, ktorý bol prepojený s nádržou hadicou systémom spojených nádob. Priebeh merania pozostával v nastavení zvoleného prietoku na prívodnom potrubí do bazéna a následne odčítaní úrovne hladiny v nádrži po cca 15 minútovom ustálení. Celkovo bolo vykonaných 14 meraní prietok-hladina pre celý rozsah mernej krivky.

Zo zameraných bodov prietokov a hladín bola vytvorená merná krivka priepadu až nad rozsah prietoku vyššieho ako aktuálny Q_{100TR} . Z preverenej mernej krivky priepadu na fyzikálnom modeli podľa súčasného reálneho stavu vyhotovenia vyplýva, že stanovený prietok $Q_{100TR} = 327 \text{ m}^3/\text{s}$ sa prevedie pri hladine 163,41 m n. m., čo je o 8 cm viac ako udával pôvodný predpoklad. Transformovaný povodňový prietok $Q_{100TR} = 474 \text{ m}^3/\text{s}$ sa prevedie pri hladine 163,97 m n. m, čo je o 20 cm vyššie ako predpoklad a zároveň o 7 cm vyššie ako maximálna prevádzková hladina nádrže. Prietok $Q = 547 \text{ m}^3/\text{s}$ sa bezpečnostným priepadom prevedie pri hladine 164,50 m n. m., čo je max. prípustný 1 metrový bezpečnostný limit pod korunou hrádze.

Z priebehu merania a spracovania dodaných podkladov vyplynuli určité súvislosti. Pôvodné merne krivky boli stanovené len do prietoku $400 \text{ m}^3/\text{s}$, čo bolo pre aktualizované návrhové prietoky nedostatočné. Pri porovnávaní pôvodných plánov výšky navrhovaného tvaru priepa-

du z r. 1961 a reálneho zamerania priepadu je vidieť odchýlky, ktoré vznikli nepresnosťou počas výstavby. Pôvodne koruna priepadu bola navrhovaná na úrovni 161,90 m n. m. po celej dĺžke. V skutočnosti však bola koruna priepadu postavená tak, že oba konce sú na úrovni cca 161,90 m n. m., ale v strednej časti približne tretina dĺžky koruny priepadu je na úrovni 162,00 – 162,05 m n. m., čo je o 0,10 – 0,15 m vyššie oproti projektu a pôvodne stanovenej mernej krivke. Podľa dodaného zamerania je dĺžka koruny priepadu 89,6 m., v manipulačnom poriadku VN Veľká Domaša sa uvádza dĺžka priepadu 92 m a koruna priepadu na úrovni 162,00 m n. m.

Pôvodný návrh a hydraulický výskum predpokladal vytváranú prúdnicovú prepádovú korunu priepadu pre dosiahnutie maximálnej kapacity pri návrhovej prepádovej výške 1,0 m. V reáli bola postavená kruhovo zaoblená prepádová koruna s polomerom zaoblenia cca 1 m, ktorá má menšiu prepádovú kapacitu. Tvar zaoblenia je od miesta k miestu iný, niekde je vrchol oblúku v strede koruny priepadu ako kruhovo zaoblená plocha a niekde je vrchol oblúku vysunutý k zdrži, čo sa približuje k prúdnicovej prepádovej korune. Projektantom a hydrotechnickým výskumníkom, ktorí navrhovali priepad, bolo jasné, že takýto priestorovo a tvarovo zložitý objekt nebude možné úplne presne zrealizovať na stavbe vtedajšími technológiami. Preto ku kapacitnej krivke z modelového výskumu priepadu pridali aj predpokladanú krivku objektu po realizácii, kde bola uvedená mierne znížená kapacita. Žiaľ, aj táto krivka sa ukázala ako nadhodnotená.



Obr. 2. Kapacitné krivky priepadu (pôvodné stanovené krivky a zameraný reálny stav vyhotovenia).

Fig. 2. Capacity curve of spillway (originally determined curves and measured real conditions of performance).

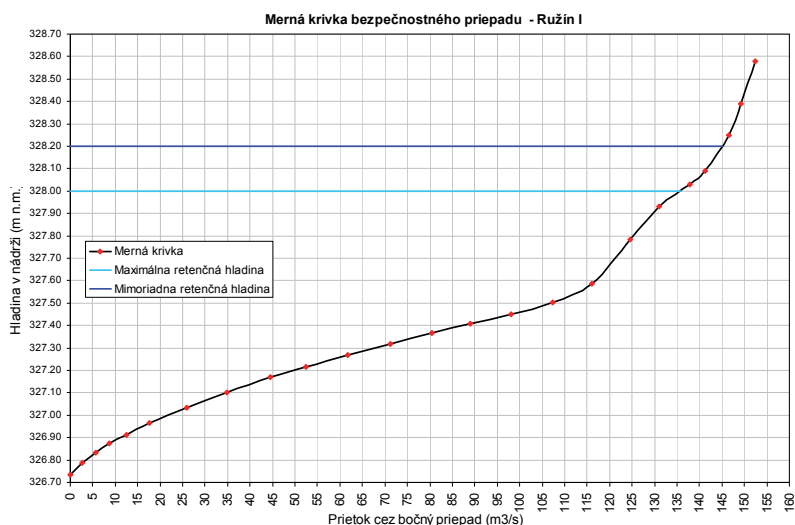
Z pohľadu celkovej kapacity priepadu z vyššie uvedených grafov vyplýva, že v rozsahu prietokov 0 – 370 m³/s nie je priepad zavzdúvaný vodou z odtokového žľabu. Od prietoku 370 m³/s vyššie, postupne rastie vplyv zavzdúvania a zahlcovania kapacity priepadu, ale tento vplyv rastie iba pozvoľna a odtokový žľab stíha odvádzať aj vyššie ako pôvodne návrhové prietoky. Určité problémy pri nových zvýšených prietokoch sú s prelievaním vonkajšej strany oblúku odtokového sklzu priepadu, ktorý bol aj na fyzikálnom modeli dodatočne zvýšený a ktoré bude potrebné prebudovať aj na reálnom priepade.

VN Ružín I

Sústava vodných nádrží Ružín I a Ružín II bola vybudovaná na rieke Hornád v rkm 78,35-68,24 v priebehu rokov 1963 – 1973. Účelom vodných stavieb, sústavy hlavnej a vyrovnávacej nádrže je výroba elektrickej energie, nadlepšovanie prietokov pre priemysel a poľnohospodárstvo, ako aj protipovodňová funkcia ochrany Košíc a okolia. Horná zásobná nádrž s maximálnou hĺbkou 54 m, s celkovým projektovaným objemom 59 mil.m³ je vytvorená kamenitou priehradou s hlineným tesnením výšky 63 m a dĺžky 330 m, združeným funkčným objektom s hradeným šachtovým priepadom kapacity 700 m³/s, doplnkovým nehradeným bočným priepadom kapacity približne 130 m³/s a vodnou elektrárnou so špičkovým výkonom 60 MW pri hĺtnosti 2 x 67 m³/s. Maximálna prevádzková hladina je 326,60 m n. m. a maximálna retenčná hladina je 327,60 m n. m. Následne po extrémnej povodni v roku 2010 bola v MP zavedená mimoriadna retenčná hladina na úrovni 328,20 m n. m.

Doplnkové nehradené bezpečnostné priepady na oboch nádržiach boli vybudované v 90. rokoch, vzhľadom na to, že pôvodné bezpečnostné priepady sa ukázali ako nedostačujúce pre prevedenie prehodnotenej návrhovej povodňovej vlny s pravdepodobnosťou opakovania 0,1 %. Bočný priepad nádrže Ružín I tvorí nehradený betónový priepad celkovej dĺžky 74,63 m s dvoma vetvami s roztvorením 146° v tvare širokého V. Koruna prúdnice tvarovaného priepadu je na úrovni 326,73 m n. m. a šírka priepadu je 1,5 m. Za priepadovou stenou sa nachádzajú žľaby šírky 4,8 m a dĺžky 30 m so sklonom 4,1 % pre odvod vody do štôlne. V strede priepadu medzi oboma ramenami je vstupný otvor šírky 8 m a výšky 5,8 m, ktorý postupne na dĺžke 2,8 m prechádza do zaobleného tlamového profilu a následne sa na dĺžke 11,3 m lievnikovo zužuje do profilu odtokovej štôlne. Tu tvorí tlamový profil so šírkou a výškou 4 m. Sklon štôlne je na dĺžke 121 m – 17,5 % a ďalej už pokračuje v sklone 2,5 %. Celková dĺžka štôlne je 446 m. Štôlna vyúsťuje do vývaru dĺžky 52 m a hĺbky 5 m. V mieste prechodu vody z odvádzacích žľabov priepadu a vtokom do štôlne sa nachádza usmerňovací klin pre nasmerovanie prúdenia vody do štôlne. Návrhová kapacita bočného priepadu bola stanovená 125 m³/s.

Pre preverenie kapacity a zmeranie mernej krivky nehradeného bočného bezpečnostného priepadu VN Ružín I bol v hydrotechnických laboratóriách ÚVH postavený fyzikálny model objektu v modelovej mierke 1:20 podľa Froudeových kritérií modelovej podobnosti. Rozmery modelu priepadu sú 2,5 m dĺžky a 0,35 m šírky. Odtoková štôlna mala priemer 0,2 m. Rozmery modelového bazénu ako výseku zdrže pred priepadom sú 5,45 x 3,20 m.



Obr. 3. Model bezpečnostného priepadu VN Ružín I a zameraná merná krivka.
Fig.3. Model of the spillway of Ružín I Water Reservoir and measured rating curve.

Na postavenom fyzikálnom modeli bočného bezpečnostného priepadu Ružín I boli vykonané merania závislosti prietoku vody cez priepad a úrovne hladiny v zdrži nad priepadom, pre celý rozsah kapacity objektu. Z nameraných hodnôt – prietokov a hladín, bola vytvorená merná krivka priepadu. Priebeh mernej krivky je vytvorený z 23 bodov meraní v rozsahu prítoku od 0 po 150 m³/s a rozsahu hladín v zdrži 326,74 až 328,60 m n. m., čo predstavuje výrazne väčší, ako povolený prípustný stav hladiny v zdrži počas povodne.

Z priebehu krivky priepadu je vidieť, že od prietoku 115 m³/s nastáva zahľtenie koruny priepadu dolnou vodou v odtokovom žľabe t. j. dolná hladina za priepadom vystúpila až na úroveň koruny priepadu, a merná krivka zmení stúpavosť. Pri prietoku približne 140 m³/s nastáva zahľtenie otvoru vtoku do štôlne a merná krivka je následne limitovaná kapacitou odtokovej štôlne a opäť sa tým mení stúpavosť krivky. Počas periodickeho zahľcovania vstupného portálu štôlne nastávalo mierne cyklické kolísanie odtoku vody do štôlne. Merania preukázali, že kapacita priepadu je vyhovujúca pre prevedenie požadovaného povodňového prietoku 125 m³/s, aj napriek tomu, že sa odtokové žľaby úplne zahľtia pri 80 % návrhového prietoku. K zahľteniu vtokového portálu odtokového tunela prichádza pri 93 % návrhovej kapacity. Kapacita doplnkového bezpečnostného priepadu na nádrži Ružín I dosahuje pri maximálnej retenčnej hladine 328,00 m n. m. hodnotu 136 m³/s a pri mimoriadnej retenčnej hladine 328,20 m n. m. sa dosiahne 145 m³/s, čo je dostatočné pre prevedenie požadovanej časti prietoku z Q₁₀₀. Modelovým výskumom sa stanovil reálny priebeh mernej krivky (hlavne pre vysoké prietoky po zahľtení žľabu) a preukázalo sa, že na prípade nie je potrebné robiť žiadne konštrukčné úpravy.

VN Ružín II

Dolná vyrovnávacia nádrž je tvorená betónovou gravi-

tačnou priehradou výšky 27 m a dĺžky 140 m s objemom 3,7 mil. m³. Stredná časť priehrady obsahuje priamy nehradený priepad dĺžky 23 m a tri hradené povodňové priepasty, každý so šírkou 5 m, s celkovou kapacitou 750 m³/s. Doplnkový bočný priepad má projektovanú kapacitu 141 m³/s. Súčasťou priehrady je aj prietokná vodná elektrárňa s výkonom 1,9 MW pri hĺtnosti 16 m³/s. Maximálna prevádzková hladina je 277,30 m n. m. a max. povodňová hladina je 278,60 m n. m. V mimoriadnych povodňových prípadoch môže vystúpiť hladina až úroveň výškovej kóty 279,00 m n. m.

Bočný priepad na dolnej vyrovnávacej nádrži Ružín II má dĺžku koruny priepadu 45,3 m a šírku 1,5 m. Má prúdnicovo zaoblenú prepádovú plochu s korunou na úrovni 277,30 m. Šírka odtokového žľabu za priepadovou stenou je 6 m so sklonom 2,27 %. Vstup do odtokovej štôlne tvorí prechod z obdĺžnikového profilu šírky 4,6 m a výšky 6,3 na dĺžke 4,3 do tlamového profilu štôlne šírky 4 m a výšky 4,4 m. Odtoková štôlna má celkovú dĺžku 180 m v jednotnom sklone 2,5 %. Nasleduje vývar dĺžky 22 m. Návrhová kapacita priepadu bola predpokladaná na hodnote 141 m³/s.

Fyzikálny model doplnkového bezpečnostného priepadu na nádrži Ružín II bol postavený v modelovej mierke 1:15 podľa Froudových zákonov mierkovej podobnosti. Modelový bazén má rozmery 4,1 x 2,7 m. Rozmery modelu bezpečnostného priepadu sú 3,2 m dĺžky a 0,5 m šírky. Priepad bol tvorený z 12 kusov presne vyrezaných a presne polohovo a výškovo osadených priečných profilov. Následne bol podľa vodiacich profilov vybetónovaný presný tvar priepadu. Prechod z obdĺžnikovej do tlamovej odtokovej štôlne a krátky úsek tunela bol vytváraný z 3 uzavretých profilov na úseku 0,95 m.

Na fyzikálnom modeli boli následne realizované merania kapacity pre 26 bodov v rozsahu prietokov 0 – 118 m³/s a rozsahu hladín 277,30 až 279,36 m n. m., čo je výrazne viac ako maximálna hladina v zdrži počas povodňovej situácie. Ukázalo sa, že priepad nedokáže dosiahnuť požadovanú kapacitu.

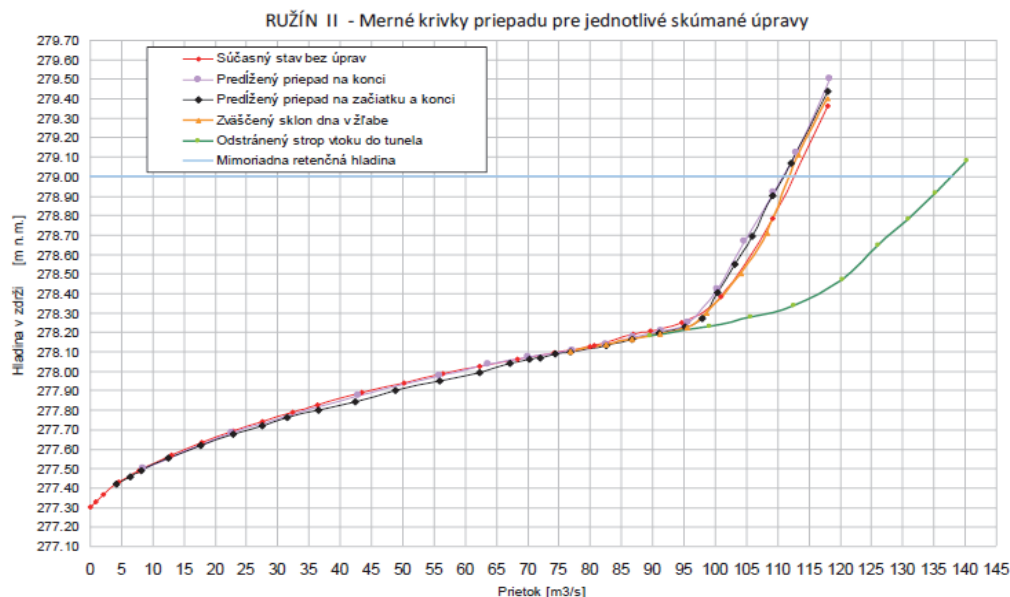


Obr. 4. Model bezpečnostného priepadu VN Ružín II a foto reálu.

Fig. 4. Model of the spillway of Ružín II Water Reservoir and photography of real conditions.

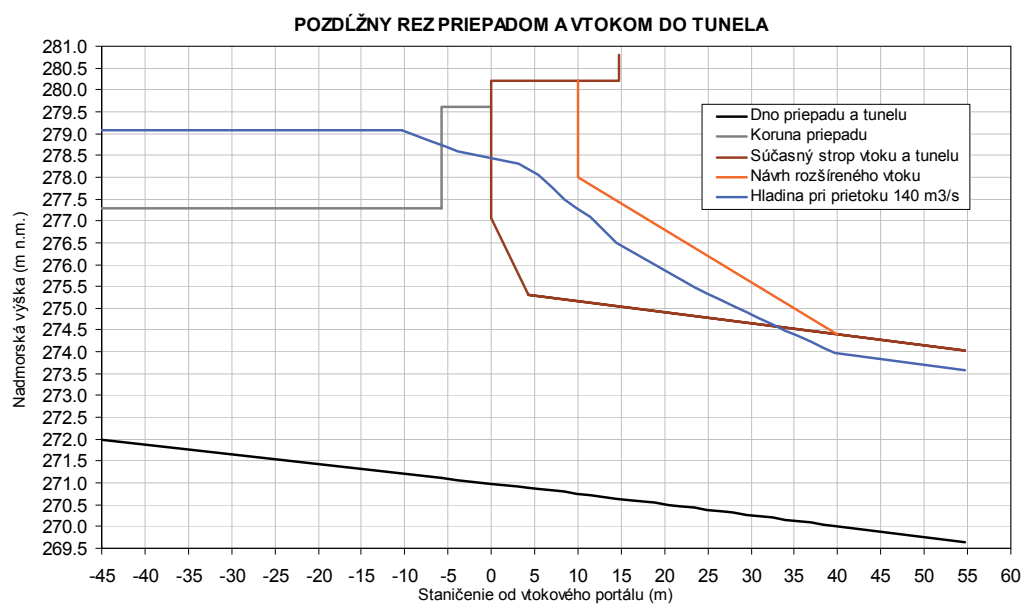
Do prietoku cca $95 \text{ m}^3/\text{s}$ je závislosť hladiny a prietoku určená klasicky tvarom a veľkosťou priepadovej steny. Od prietoku $95 \text{ m}^3/\text{s}$ hladina vody v odtokovom žľabe zahlučuje vtokový otvor do odtokovej štôlne, preto sa tu výrazne mení strmosť stúpania mernej krivky. Hladina prestane klesať smerom k tunelu a zavzdutím o zúžený lievnik vtoku sa vyrovná na úroveň hladiny zdrže. Pre mimoriadnu retenčnú hladinu na úrovni $279,00 \text{ m n. m.}$

je kapacita priepadu $112 \text{ m}^3/\text{s}$, čo je značne nižšie o $29 \text{ m}^3/\text{s}$, ako bola požadovaná kapacita $141 \text{ m}^3/\text{s}$, v zmysle požiadaviek manipulačného poriadku. Vzhľadom na preukázanie nedostatočnej kapacity bočného bezpečnostného priepadu, boli so správcom vodného diela prekonzultované možné návrhy na konštrukčné zmeny priepadu. Následne boli otestované na fyzikálnom modeli za účelom dosiahnutia požadovanej



Obr. 5. VN Ružín a jeho merné krivky pre skúmané úpravy.

Fig. 5. Ružín II Water Reservoir and related rating curves for investigated modifications.



Obr. 6. VN Ružín II priebeh hladiny vo vtoku do tunela pri max. návrhovom prietoku $141 \text{ m}^3/\text{s}$.

Fig. 6. Ružín II Water Reservoir – water level regime in the tunnel inlet at a maximum design discharge of $141 \text{ m}^3/\text{s}$.

kapacity 141 m³/s. Navrhnuté boli 4 postupné úpravy, od miernych a konštrukčne nenáročných, až po výrazné nákladné riešenia. Až posledná radikálna úprava priniesla požadovaný efekt. Krajné riešenie predstavovalo odrezanie stropu prechodového lieviku, ako aj stropu tunela na dĺžke 2,6 m. Následne bol pre požadovaný maximálny prietok 141 m³/s zameraný priebeh voľnej hladiny na celej dĺžke, aby bolo zaznamenané postupné klesanie smerom od konca priepadu cez vtok do tunela. Na takto otvorenom vtoku do tunela sa zamerala kapacitná krivka, či vôbec daný žľab prevedie požadovaný prietok po stanovenú mimoriadnu retenčnú hladinu. Z grafu zameraných bodov je vidieť, že požadovaný maximálny prietok 141 m³/s sa prevedie pri hladine v zdrži 279,08 m n. m., čo je o niečo viac ako mimoriadna retenčná hladina stanovená v súčasnom manipulačnom poriadku. Následne bol pre daný návrhový prietok 141 m³/s zameraný priebeh klesania hladiny smerom od konca priepadu do tunela. Vzhľadom na to, že voda tu má vysoko turbulentný režim skrutkovitého pohybu, tak pokles hladiny je veľmi pozvoľný a na požadovanú úroveň hladiny v tuneli sa dostane až na dĺžke 40 m od konca priepadu (priebeh klesania je na nižšie uvedenom pozdĺžnom profile). Podľa zisteného priebehu hladiny by následne bolo potrebné prebudovať vtokový portál a lievikovitý prechod do tunela tak, aby nebol strop zahľtený, čo predstavuje jeho zvýšenie cca o 0,5 – 1 m vyššie ako maximálna dosiahnutá hladina.

VN Sigord

Vodná nádrž Sigord sa nachádza na toku Delňa nad obcou Kokošovce v Prešovskom kraji. Bola vybudovaná v roku 1969, ako nádrž pre závlahy, chov rýb, rekreačné účely a nadlepšovanie biologických prietokov v toku. Homogénna hrádza je vysoká 10 m nad terénom údolia. Koruna hrádze je na úrovni 409,60 m n. m. Maximálna udržiavaná prevádzková hladina je na úrovni 408,10 m n. m. Maximálna povodňová (retenčná) hladina je na úrovni 408,60 m n. m. a mimoriadna povodňová hladina, pri funkcii len bočného priepadu, je 408,71 m n. m. Uvedené hodnoty sú vo výškovom systéme Balt po vyrovnaní. V strede nádrže sa nachádza združený funkčný objekt, ktorý obsahuje malý bezpečnostný priepad s kapacitou 1 m³/s a dnový výpust s kapacitou 10 m³/s pri max. prevádzkovej hladine. Na pravom brehu nádrže je bočný bezpečnostný priepad s dĺžkou koruny 40 m a udávanou kapacitou 42 m³/s napojený na sklz.

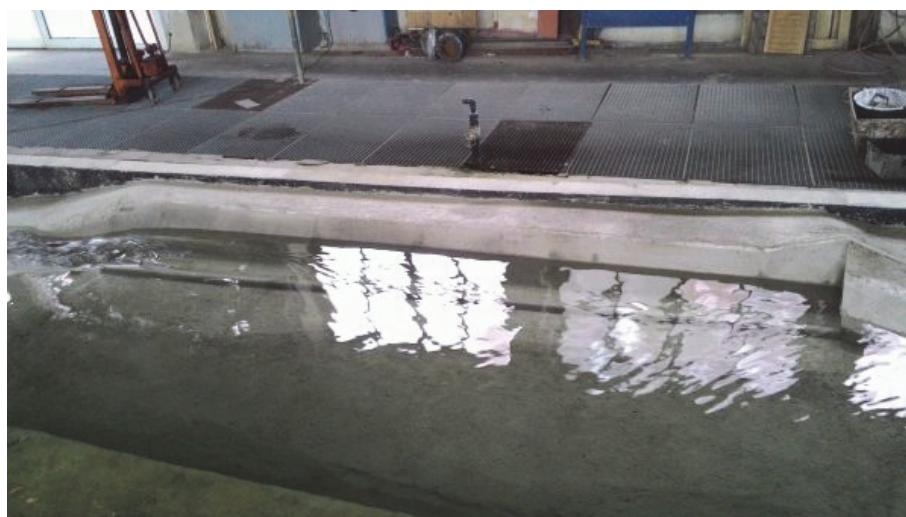
Pre danú úlohu boli použité aktuálne hydrologické podklady vo forme n-ročných prietokov (tab. 3).

Fyzikálny model bol postavený podľa Froudovho zákona modelovej podobnosti v mierke 1:13. Na postavenom modeli súčasného stavu priepadu sa realizovali merania závislosti prietoku od úrovne hladiny v zdrži, t.j. meranie kapacitnej krivky bočného priepadu. Merania boli vykonané pre 15 bodov v rozsahu hladín od koruny

Tabuľka 3. N-ročné prietoky pre VN Sigord

Table 3. N-year discharges for the Sigord Water Reservoir

N (rok)	1	5	10	20	50	100
Q (m ³ /s)	7	17	22	28	37	45

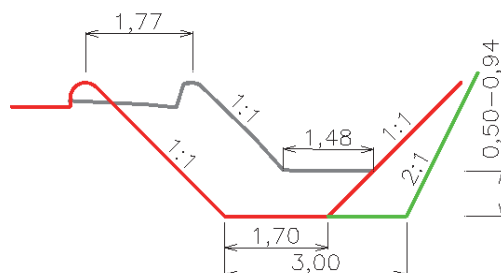


Obr. 7. Meranie kapacity bezpečnostného priepadu, pôvodný stav pri $Q=15,9$ m³/s.
Fig. 7. Spillway capacity measurement, original conditions at $Q=15.9$ m³/s.

priepadu po korunu hrádze. Zo zameranej konzumnej krivky vyplýva výrazne nedostatočná kapacita.

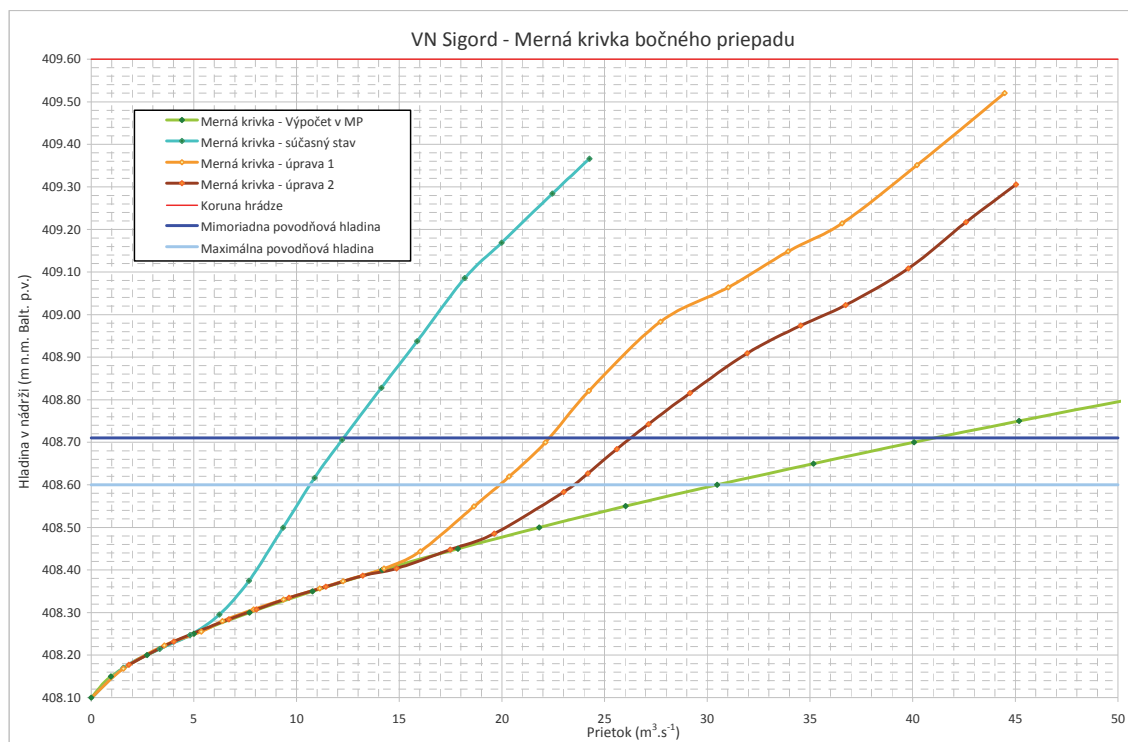
Bočný priepad má pri maximálnej retenčnej hladine v zdrži na úrovni 408,60 m n. m. kapacitu 10,6 m³/s, čo predstavuje približne len 1,5 ročný prietok. Pri mimoriadnej povodňovej hladine 408,71 m n. m. sa dosiahla kapacita priepadu 12,2 m³/s, čo predstavuje približne len 2,5 ročný povodňový prietok. Pri hladine v zdrži 409,37 m n. m., čo je 23 cm pod korunou hrádze sa dosiahne odtoková kapacita priepadu 24 m³/s, čo predstavuje približne 11 ročný prietok. Výsledkom merania je zistenie, že súčasný bezpečnostný priepad ani zdáleka nemá dostatočnú kapacitu na prevedenie prietoku Q_{100} . Požadovaný prietok $Q_{100} = 45$ m³/s by sa extra-

poláciou krivky dosiahol až pri hladine približne 410,35 m n. m., čo je o 0,75 m vyššie ako koruna hrádze. No pri operatívnom zapojení bezpečnostného priepadu s dnovým výpustom združeného objektu predstavuje celkový prevedený prietok nádržou 44 m³/s pri hladine na úrovni koruny hrádze, čím by sa presne previedol transformovaný 100 ročný prietok nádržou. Hlavný problém bočného priepadu je nedostatočná odtoková kapacita žľabu za priepadom. Odtokový žľab sa úplne zahltí už pri veľmi malých prietokoch, nad 6 m³/s, a hladina v žľabe vystúpi až na úroveň hladiny nádrže. Nastane jav, že horná polovica priepadu vôbec neodvádza prietok a funkčná zostane len dolná polovica priepadu, kde ešte ostane mierny sklon odtekajúcej hladiny.



Obr. 8. Porovnanie pôvodného a upraveného profilu priepadu (šedá – súčasne, červená – úprava 1, zelená – úprava 2).

Fig. 8. Comparison between original and modified spillway profiles (grey – original, red – modification 1, green – modification 2).



Obr. 9. Merné krivky bezpečnostného priepadu VN – výpočet, súčasný stav a úpravy.

Fig. 9. Rating curves of water reservoir spillway – calculation, original conditions and modifications.

Na základe tejto skutočnosti sme pristúpili k prvej úprave priepadu. Tá spočívala v prehĺbení a zväčšení sklonu dna odtokového žľabu z 1.94 % na 3 %. Po celej dĺžke bolo vykonané rozšírenie dna odtokového žľabu z cca 1.50 m na 1.70 m a tým posunutie priepadovej hrany o 1,3 až 1,8 m smerom do nádrže. Pri prestavbe sa zachovali sklony svahov žľabu ako aj výška priepadovej hrany na kóte 408,10 m n. m. Tvar priepadovej hrany je oblúk polomeru 0,25 m a prechádza do priamej časti v sklone 1:1.

Po prebudovaní priepadu a odtokového žľabu boli realizované nové merania. Počas merania sme zistili, že pri vyšších prietokoch sa v odtokovom žľabe vytvára vír v mieste, kde priepadová hrana prechádza do telesa hrádze. Tento vír spätne zavzdúva hladinu v odtokovom žľabe a spomaľuje odtok vody v celom žľabe. Vír môže ovplyvniť stabilitu svahov a cesty III. triedy. Preto sme pristúpili k úprave odtokového žľabu tak, aby sa zmiernil vplyv víru na odtok vody žľabom a na stabilitu svahov.

Druhá úprava teda spočívala v ďalšom miestnom rozšírení odtokového žľabu na šírku dna 3 m a zmeny sklonu pravostranného svahu 2:1. Rozšírenie dna nie je po celej dĺžke, ale začína vo vzdialenosti 22 m od začiatku priepadu. Prechodová časť je dlhá 6,5 m s plynulou zmenou sklonu pravostranného svahu z 1:1 na sklon 2:1. Potom nasleduje priama časť so šírkou dna 3 m na vzdialenosti 24,7 m. Na vzdialenosti 6,5 m sa mení šírka dna z 3 m späť na 1,5 m, pričom koniec tohto zúženia je v mieste zmeny sklonu dna odtokového žľabu z 3 % na 10 %.

Po druhej prestavbe sa síce zvýšila kapacita priepadu, ale stále bola nedostatočná. Priepad sa začne zahlcovať pri prietoku 20 m³/s. Pri maximálnej povodňovej hladine 408,60 m n. m. sa dosiahla kapacita priepadu 23,5 m³/s, čo predstavuje približne 15 ročný povodňový prietok. Návrhový povodňový prietok 45 m³/s sa dosiahne pri hladine 409,30 m n. m. čo je úroveň hladiny 30 cm pod korunou hrádze. Pri operatívnom zapojení priepadu a dnového výpustu združeného objektu s doplnkovými kapacitami 1,8 m³/s a 10,35 m³/s by sa vodným dielom previedol návrhový 100 ročný celkový prietok 45 m³/s pri hladine 408,95 m n. m., čo je 0,65 m

pod korunou hrádze. Na rozsiahlejšie úpravy odtokového žľabu už nie sú priestorové možnosti a úpravy by si vyžiadali prekládku cesty.

Záver

Bezpečnostné priepady vyzerajú na pohľad jednoducho, ale z pohľadu hydrauliky sú tu veľmi komplikované pomery prúdenia vody, kde je prepád vody cez priestorovo a prierezovo zaoblenú pevnú stenu, pri vyšších prietokoch pulzujúco a postupne od konca zavzdúvanú. Vodný skok krútiacej sa vody v odtokovom žľabe je s mnohými pulzáciami, víreniami a zahlcovaním otvorov premostení a tunelov. Z tohto dôvodu sú takéto priepady dosť komplikované stavby na komplexné posúdenie pomocou teoretických výpočtov alebo numerického modelovania, pretože takýto model by musel byť veľmi detailný, s presným výpočtom turbulencie a prechodu riečného – bystrinného režimu, čo je stále problém pre aj 3D súčasné modely. Preto reálnou možnosťou ich správneho posúdenia je stále testovanie na trojrozmernom fyzikálnom hydraulickom modeli reálneho prúdenia vody pri správnom návrhu mierky a poznaní limitov mierkovej podobnosti. Vzhľadom na meniace sa klimatické a hydrologické podmienky od výstavby nádrží je potrebné pre všetky vodné nádrže na Slovensku aktualizovať návrhové povodňové prietoky a následne otestovať reálnu kapacitu bezpečnostných priepadov, prípadne navrhnúť konštrukčné úpravy na ich požadované zvýšenie kapacity.

Literatúra

- Čomaj M., Rebenda F. (2014): Prehodnotenie kapacity bezpečnostného priepadu VN Veľká Domaša, VÚVH Bratislava; s. 18.
- Čomaj M., Rebenda F. (2016-2017): Prehodnotenie kapacity nehradeného bezpečnostného priepadu VN Ružín I a Ružín II; VÚVH Bratislava; s. 22.
- Rebenda, F., Čomaj, M. (2016): Prehodnotenie kapacitnej krivky bezpečnostných priepadov vodných nádrží vzhľadom na klimatické zmeny; VÚVH Bratislava; s. 17.

REASSESSMENT OF SPILLWAY CAPACITY OF SELECTED WATER RESERVOIRS ADMINSTRATED BY THE SLOVAK WATER MANAGEMENT ENTERPRISE, BRANCH KOŠICE, USING HYDRAULIC PHYSICAL MODELING

Water reservoirs in Slovakia were built mainly in the 60s and 70s of the last century, taking into account the capacities of hydrological conditions of that period. Since then, after more than 50 years, climatic conditions have changed and the design flood discharges have been reassessed. Especially during the extreme hydrological

year 2010, it turned out that many older reservoirs have problems with the capacity of safety spillways and the actual flood discharges. Therefore, the revision of safety spillways of water reservoirs have started along with the searching for reconstruction solutions to increase their capacity.

The experts of the WRI Hydraulic Laboratories performed several research tasks on the reassessment of rating curves of uncontrolled spillways of water reservoirs administrated by the Slovak Water Management Enterprise, branch Košice, using physical hydraulic modeling.

The paper focuses on the recent model research of uncontrolled spillways of the hydraulic structures Veľká Domaša, Ružín I, Ružín II and Sigord. In the past, the capacity of these structures was often determined only by theoretical calculation or assessed using 1D and 2D numerical model, which proved to be insufficient. The errors of structure design have been proved and in many cases of investigated hydraulic structures, the capacity of spillway has shown to be insufficient regarding the revised design flood discharges. There is a real helical motion of water in the discharge flumes under the spillways, as in the stilling pool of weir, where the lower water level below the spillway significantly increases and affects the overflow by backwater. This

causes a deviation from calculations that are done using simplified numerical models. Subsequently, it was necessary to design and test appropriate construction design modifications of the given spillways in order to increase their capacity to reach the required value.

Taking into account changing climatic and hydrological conditions, it is necessary to update the design flood discharges for all water reservoirs in Slovakia and subsequently to test the capacity of spillways, or to propose construction design modifications to increase their capacity. Considering the complex hydraulic conditions of the water flow in spillways, which actually create a stilling pool under the uncontrolled weir with the longitudinal flow of circulating water and subsequent overflowing of the spillways and sluices, the only possibility of their correct assessment is the testing using three dimensional physical hydraulic model. Reliable operation of hydraulic structures can be provided only through the accurate update and subsequent implementation of measures.

Ing. Dušan Abaffy, PhD.
Ing. Marek Čomaj
Ing. Filip Rebenda
Ing. Vladimír Polák
Výskumný ústav vodného hospodárstva
nábr. arm. gen. L. Svobodu č.5
812 49 Bratislava
Slovenská republika
Tel.: +421 2 59 343 239
+421 2 59 343 389
+421 2 59 343 216
+421 2 59 343 280
E-mail: abaffy@vuvh.sk
comaj@vuvh.sk
rebenda@vuvh.sk
polak@vuvh.sk

Ing. Dušan Mydla
Slovenský vodohospodársky podnik š.p.
Odštepny závod Košice
Ďumbierska 14
041 59 Košice
Slovenská republika
Tel.: +421 55 60 081 13
E-mail: dusan.mydla@svp.sk