

LES KRÁLOVSTVÍ - MODELOVÝ VÝZKUM ŠACHTOVÉHO PŘELIVU

LES KRÁLOVSTVÍ – MODEL RESEARCH OF SHAFT SPILLWAY

*Prof. Ing. Vojtěch Broža, DrSc., ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydrotechniky
Ing. Martin Králík, Ph.D., ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydrotechniky*

Abstrakt

Tento článek se zabývá hydraulickým výzkumem šachtového přelivu na vodním díle Les Království. V hydrotechnické laboratoři byl vybudován fyzikální model pravého šachtového přelivu VD Les Království a byl umístěn do měrného žlabu. Hydrotechnický výzkum popisuje měření úrovní hladin, průtoků a tlaků na přelivu a v odpadním vedení. Na modelu bylo vyhodnoceno 6 typů technických možností úprav šachtového přelivu. Výsledky výzkumu jsou: porovnány teoretické a naměřené konzumční křivky a srovnány průběhy tlaků v celé délce odpadního vedení při všech úpravách šachtového přelivu.

***Klíčová slova:** fyzikální modelování, modelová podobnost, šachtový přeliv*

Abstract

This paper deals with the Les Království dam. In hydrotechnical laboratory was built physical model of shaft spillway on this dam and the model was placed into a channel. This work describes measurement pressures in spillway and water level. There were 6 types of technical options, it depended on landscaping. The research's results are comparison theoretical and measured discharge rating curve and determine the course of pressures in the entire length of the outfall structure.

***Key words:** physical modeling, model similarity, shaft spillway*

Úvod

Šachtový přeliv je vhodným typem pojistného zařízení při menších návrhových průtocích, je-li obtížné vytvořit korunový přeliv nebo skluz od bočního přelivu v úzkém údolí se strmými svahy. Jeho výhoda se zvětší při zapojení do sdruženého objektu nebo při využití obtokového tunelu jako odpaďu od přelivu. Šachtový přeliv obsahuje vtokovou část, přechodovou část, šachtu, koleno a odpadní štolu. Vtoková část je v půdoryse zpravidla kruhová s hydraulicky vhodnou korunou, v minulosti často se širokou korunou. Na koruně a ve vtokové části se často navrhnou usměrňovací žebra, která brání vzniku náhodných vírů a stabilizují proudění. Zakřivená vodící žebra vytvářejí v nálevkovité přechodové části a v šachtě spirálový průtočný režim. Rozdělení tlaků na plášti přelivu je rovnoměrnější. Vodní paprsek je k němu v horní části přelivu přitlačován, takže nevznikají podtlaky, vyvolávající kavitační jevy a chvění. Zahlcování šachtového přelivu je složitý hydraulický proces. Se zvětšováním průtoku postupně roste délka zahlceného úseku šachty, do něhož přechází přechodovým jevem vodní proud, volně padající šachtou. Vtoková i přechodová část přelivu musí být řešena tak, aby se nezahltila dříve než šachta. Hydraulické řešení musí zahrnovat všechny hydraulické jevy při dvoufázovém proudění [5].

Tento článek se zabývá výzkumem šachtového přelivu na vodním díle Les Království. Jedná se o speciální typ bezpečnostního přelivu převádějící zvýšené průtoky svislou šachtou, na kterou navazuje vodorovná štola spojující prostor nádrže s prostorem pod hrází. Při návrhu kapacity je nutné, aby návrhový průtok byl vždy převeden beztlakovým prouděním. V případě zahlcení odpadní šachty přelivu se velmi výrazně snižuje jeho kapacita [6]. Tento typ bezpečnostního přelivu se v novodobé historii navrhuje především u sypaných přehrad, u starších vodních děl je však možné se s ním setkat i u zděných, gravitačních přehrad, jako je tomu i na vodním díle Les Království.

VD Les Království

Identifikační údaje

Název vodního díla: Les Království
Vodní tok: Labe
ČHP: 1-01-01-067
Kraj: Královéhradecký

Základní technické údaje vodního díla

Typ hráze: gravitační, zděná, půdorysně zakřivená
Kóta koruny hráze: 327,31 m n. m. (Balt. p. v.)
Délka koruny hráze: 218 m
Šířka koruny hráze: 7,2 m
Max. výška koruny hráze nad terénem: 32,7 m
Kóta dna odpadní štoly od pravého šachtového přelivu: 300,00 m n. m. (Balt. p. v.)

Vodní dílo Les Království disponuje 5 spodními výpustmi (1 je umístěna v tělese hráze, 4 jsou umístěny v obtokových štolách). Jejich profily se pohybují od DN 1000 mm po DN 2000 mm.

Bezpečnost proti přelití vodního díla zajišťují 3 bezpečnostní přelivy. Jeden je korunový s celkovou délkou přelivné hrany 54,70 m umístěnou na kótě 324,00 m n. m. Zbylé dva jsou pak přelivy šachtové, přičemž každý je umístěn na jednom z břehů. Levý má korunu přelivu na kótě 323,40 m n. m. (Balt. p. v.), s délkou přelivné hrany 21,86 m a průměrem odpadní šachty 4,20 m. Modelový výzkum se věnoval šachtovému bezpečnostnímu přelivu umístěnému na pravém břehu. Přelivná hrana o délce 33,63 m je umístěna na kótě 323,40 m n. m (Balt. p. v.). Na odpadní šachtu o průměru 5,10 m navazuje vodorovná štola o průměru 6,0 m. Maximální kapacita tohoto objektu je uváděna $111,70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr 1: Šachtový přeliv na VD Les Království

Na pravém břehu je pod hrází vodního díla umístěna vodní elektrárna se dvěma horizontálními turbínami typu Francis, každá o výkonu 1,105 MW. Maximální hltnost každé z turbín je $6,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Kóta hladiny stálého nadržení je na úrovni 307,60 m n. m (Balt. p. v.). Zásobní objem nádrže činí v letním období až 1,42 mil. m^3 , kdy je kóta hladiny na úrovni 315,60 m n. m (Balt. p. v.). Les Království disponuje i ochranným prostorem. Ovladatelný je o velikosti až 4,87 mil. m^3 v zimním období a neovladatelný o velikosti 1,18 mil. m^3 . Kóta hladiny vody v nádrži je pak na úrovni 323,40 m n. m. (Balt. p. v.), resp. 324,85 m n. m. (Balt. p. v.) [1], [4].

Hydrologické údaje

m - denní průtoky (Q_m) [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

m	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q_m	13,5	9,43	7,38	6,04	5,06	4,30	3,67	3,13	2,65	2,21	1,77	1,34	1,10

N - leté průtoky (Q_N) [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

N	1	2	5	10	20	50	100
Q_N	59,3	86	127	162	200	256	301

Metodika výzkumu

V rámci výzkumu byl vyroben fyzikální model šachtového přelivu vodního díla Les Království ve vodohospodářské laboratoři, Fakulty stavební, ČVUT v Praze. Cílem bylo zjistit hydraulické chování přelivu za různých průtoků a různých technických úprav, včetně proudění vody v okolí přelivu [7]. Z naměřených hodnot se získaly průběhy hladin, které se porovnály s výpočty, a tlakové poměry v odpadní šachtě.

Modelové podmínky

U Froudova typu modelové podobnosti jsou vyjádřeny podmínky dynamické podobnosti hydrodynamických jevů za výhradního působení gravitačních sil. Kromě gravitačních sil však mohou zkoumané proudění ovlivňovat i další síly – odpor třením vazké kapaliny, síly kapilární, síly objemové apod. Podle Froudových vztahů můžeme určitý hydrodynamický jev zkoumat tehdy, jestliže účinky těchto sil jsou zanedbatelné v porovnání s gravitačními silami. Mezní podmínky vymezují oblasti a měřítka, v nichž lze hydrodynamický jev modelovat. Kinematicky podobné jevy, které ovlivňuje výhradně gravitační síla, jsou dynamicky podobné, jestliže ve vzájemně příslušných průřezech budou stejná Froudova čísla.

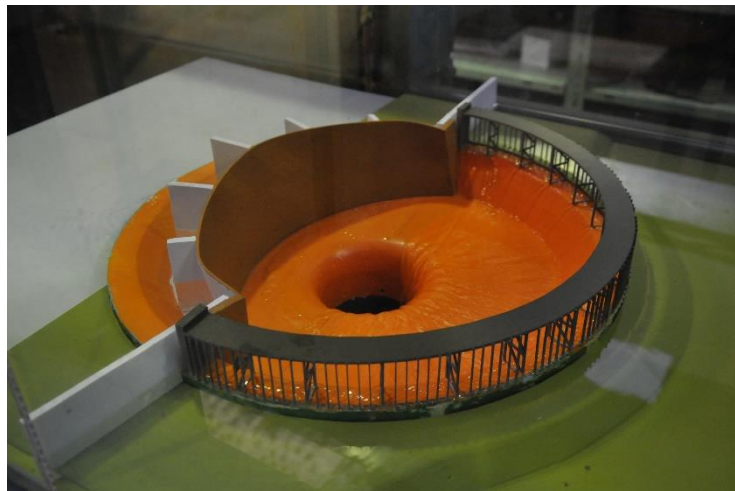
Při modelování jevů proudění v oblasti Froudovy podobnosti se může uplatnit povrchové napětí vody. Povrchové napětí se neuplatní tehdy, pokud je přepadová výška na modelu $h \geq 20 \text{ mm}$. Pokud je $h \leq 20 \text{ mm}$ pak přechází tvar přepadajícího paprsku vlivem kapilárních sil téměř do přímky. Povrchová rychlost proudu na objektových modelech má být $u \geq 230 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, aby kapilární síly nebránily tvoření povrchových vln vlivem gravitačních sil. Při modelování podle

Froudovy podobnosti musí být světlá šířka přelivného pole na modelu $b_0 \geq 60$ mm. Výtokový otvor musí být $a \geq 60$ mm, aby jev výtoku a tvar výtokového paprsku nebyly nepříznivě ovlivňovány drsností dna a stěn účinkem povrchového napětí. Hloubka vodního proudu na modelu musí být $h \geq 15$ mm – důležité hlavně u říčních modelů. Na modelu je nutné zachovat stejný režim proudění jako na skutečném díle. Při modelování otevřených koryt podle Froudovy podobnosti se můžeme setkat s prouděním říčním, u něhož je $Fr < 1$, kritickým, u kterého je $Fr = 1$, nebo s prouděním bystřinným s $Fr > 1$. To je možné zajistit především volbou měřítka modelu a také zajištěním redukované drsnosti omáčených ploch [8].

Na základě geometrické podobnosti se určí měřítko délek M_l . Potom pro měřítko rychlostí platí: $M_v = M_l^{1/2}$, pro měřítko průtoků platí: $M_Q = M_l^{5/2}$ a pro měřítko času platí: $M_t = M_l^{1/2}$.

Měřítka modelu VD Les Království bylo určeno na základě mezních podmínek modelové podobnosti, možnostech laboratoře, konstrukčních možnostech a podmínek reprezentativnosti výzkumu. Zvolené měřítko bylo určeno $M_l = 1:36,04$, měřítko rychlostí je $M_v = 1:6,0$, měřítko průtoků je $M_Q = 1:7797,6$ a měřítko času je $M_t = 1:6,0$.

Celý model měl délku $L = 4$ m, výšku $H = 1$ m a šířku $B = 1$ m. Voda byla k modelu šachtového přelivu VD Les Království přiváděna rozváděcím potrubím v laboratoři, průtok byl měřen pomocí magneticko-indukčního průtokoměru, voda byla uklidněna v uklidňovací nádrži. Voda z modelu byla odvedena sběrnou nádrží do podzemních prostor vodohospodářské laboratoře, kde je umístěna centrální akumulace vody.



Obr 2: Model umístěný ve žlabu s čidlem snímajícím výšku hladiny

Variantní řešení

Modelový výzkum byl rozdělen na 6 variant podle technické úpravy okolí vtoku ale i samotné přelivné hrany. Na všech variantách bylo odměřeno deset průtoků odpovídajících m-denním průtokům m_{180} , m_{120} , m_{30} a N-letým průtokům N_1 , N_2 , N_5 , N_{10} , N_{20} , N_{50} , N_{100} .

Varianta 1 – tato varianta byla počítána bez úprav, tedy samotný válcový objekt šachtového přelivu.

Varianta 2 – v této variantě je model doplněn o „terén“, který zpřesňuje proudění vody do přelivu bez možnosti vlivu svislého proudění.

Varianta 3 – model byl doplněn o svislý terén zasahující do prostoru přelivu, což má simulovat současný stav na VD Les Království.

Varianta 4 – model byl doplněn o česle umístěné po celém obvodu přelivné hrany, čímž byl dosažen přesný model současného stavu.

Varianta 5 – tato varianta byla doplněna o čtyři levotočivé usměrňovače proudění umístěné na vtoku do šachty modelu.

Varianta 6 – tato varianta byla doplněna o čtyři pravotočivé usměrňovače proudění umístěné na vtoku do šachty modelu.



Obr 3: varianty 1, 2, 3, 4, 5 a 6 (z leva nahoře)

Vyhodnocení měření

Konzumční křivky

Jedním z úkolů laboratorního modelového výzkumu bylo porovnání konzumčních křivek získaných měření na modelu s konzumčními křivkami dosaženými klasickým výpočtem [3].

Rovnice použitá pro výpočet přepadu byla ve tvaru:

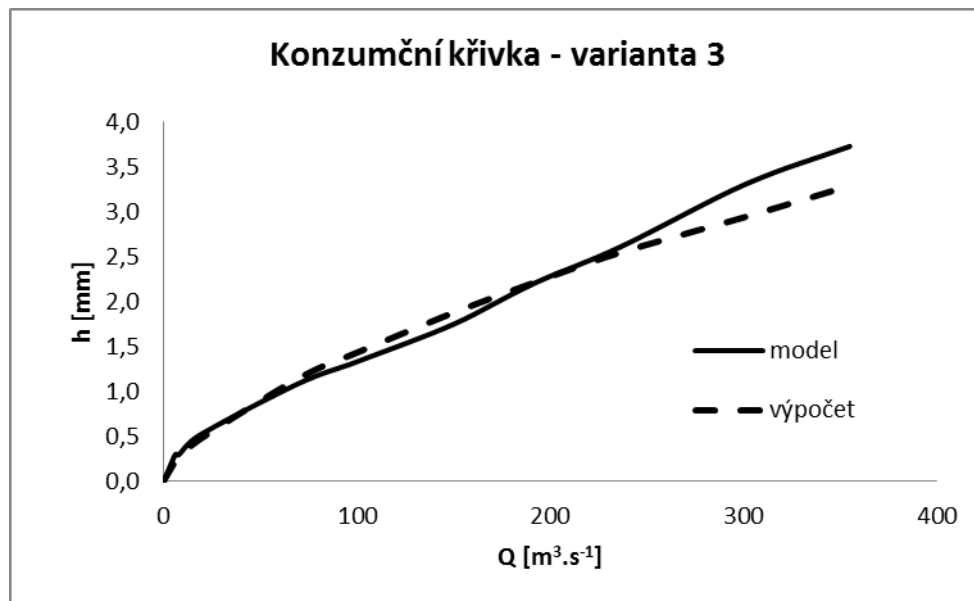
$$Q = m \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h_0^{3/2}$$

- kde m je součinitel přepadu, který byl odvozen na základě poměrů výšky přepadajícího paprsku a šířky přelivné hrany,
 b je délka přelivné hrany [m],
 g je tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],
 h_0 je výška přepadového paprsku [m].

Při porovnání dosažených výsledků byla vyhodnocena relativně velká přesnost výpočtů s modelem. Takřka totožných hodnot bylo dosahováno u většiny variant při vyšších průtocích.

Na obr. 4 je uveden příklad konzumčních křivek. Na grafu pro variantu 3 je patrné výrazné odchýlení křivky modelu při vyšších průtocích. To je způsobeno průběžným zahlcováním odpadní šachty a tedy snižováním její kapacity. Při nižších průtocích lze však konstatovat, že přesnost vypočtených hodnot a hodnot naměřených na modelu je uspokojující.

Nejvýraznější rozdíl v naměřených a vypočtených hodnotách byl patrný u varianty 2 a 5. U varianty 2 je to pravděpodobně díky vlivu „terénu“, který omezuje vliv svislého proudění. U varianty 5 se negativně projevil vliv levotočivých usměrňovačů, které způsobily snížení kapacity již při nižších průtocích a to až o 30 % oproti stavu s usměrňovači pravotočivými nebo bez těchto prvků.



Obr 4: Konzumční křivka – varianta 3

Kapacita přelivů

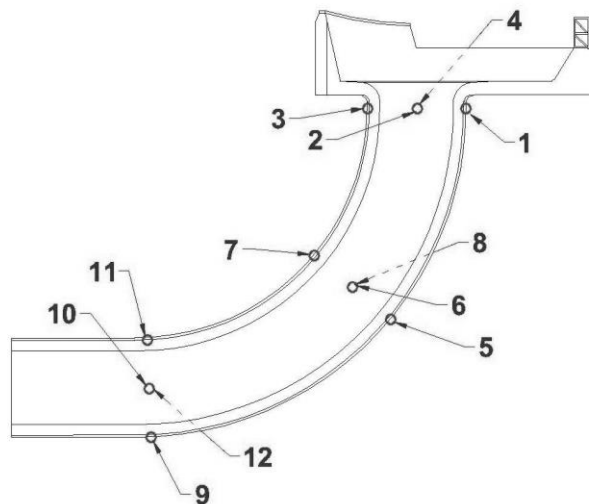
Pro všechny varianty byly stanoveny návrhové průtoky způsobující zahlcení odpadní šachty. Průběh zahlcení pro všechny varianty odpovídal takřka přesně kritériím stanoveným Bollrichem (1965). Ten uvádí, že přepad přes šachtový přeliv je dokonalý pro $h/R < 0,45$. Při $h/R > 0,60$ dojde k zahlcení vtokové části. Pro poměr h/R mezi 0,45 a 0,60 platí přechodový stav [2].

Při přechodu do zahlceného vtoku bylo možné sledovat nepravidelné pulzace projevující se strhnutím paprsku do odpadní šachty následovaný mohutným vývěrem vody zpět do nádrže. Tento stav byl patrný u všech variant, přičemž pro varianty 5 a 6 nastal tento stav nejdříve, pro variantu 1 naopak nejpozději.

Tlakové poměry v odpadní šachtě

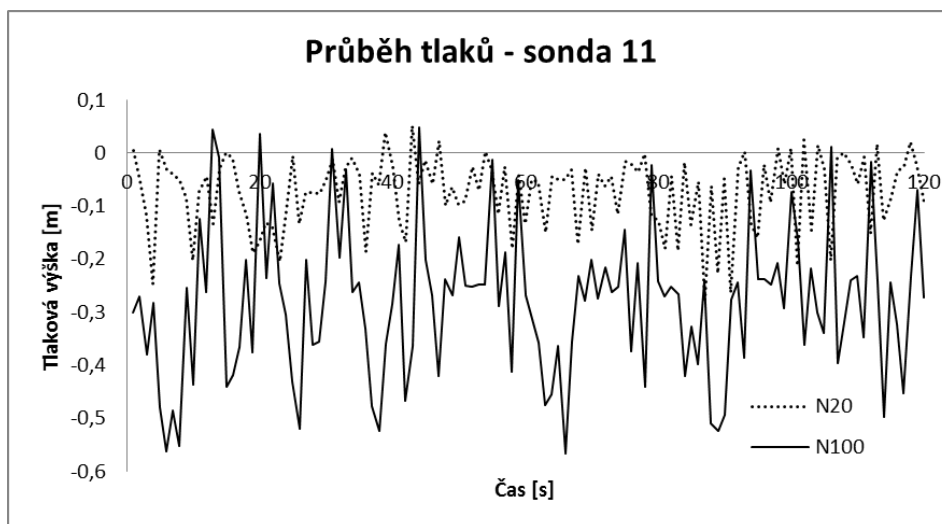
Pro všechny varianty a návrhové průtoky byly měřeny relativní hydrodynamické tlaky v reálném čase. K měření bylo použito 12 piezometrických sond, které byly z místa snímání napojeny na tlakové sondy v intervalu 1 sekunda.

Sondy byly rozmístěny ve třech výškových úrovních po 4 sondách osazených kolmo k odpadní šachtě. Vzdálenost jednotlivých sond v jedné úrovni byla stejná. Schéma umístění sond je na obrázku níže.



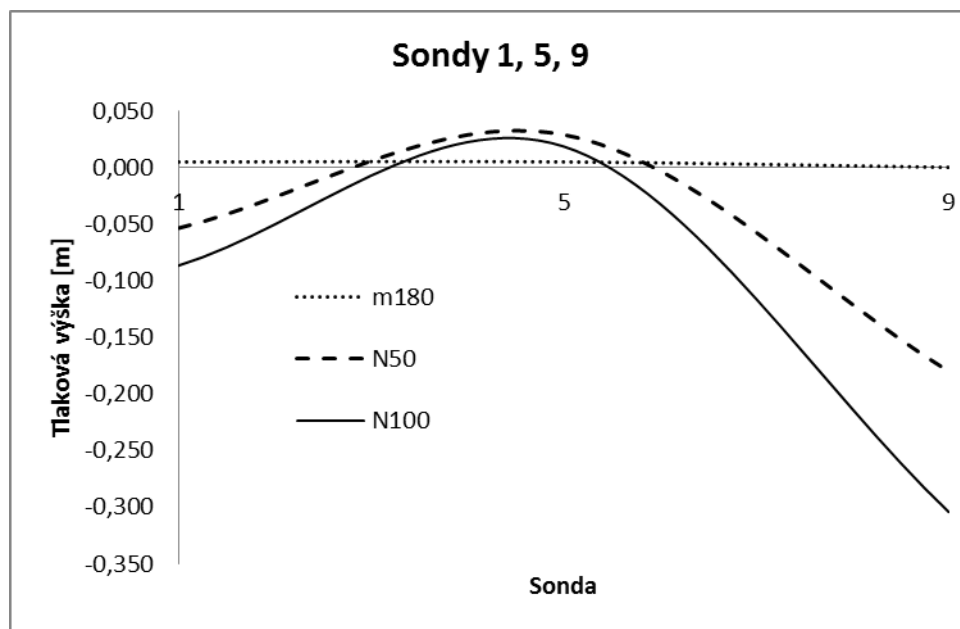
Obr 5: Schéma rozmístění tlakových sond

Ze získaných hodnot jsou patrné velmi výrazné rozdíly tlaků podle umístění sondy a průtoku. Nejvyšší rozpětí tlaků bylo dosahováno vždy při průtocích způsobující zahlcení. Nejvíce tlakem namáhaným místem byla lokalizována oblast spodních sond umístěných před rozšířením odpadního potrubí. Jedná se o sondy 9, 11, 12 a především 10. Nejméně namáhaným místem je pak horní úroveň sond, především sondy 2 a 3 a ve střední úrovni sonda 5. Z grafů je možné identifikovat i jednotlivé fáze nasávání a opětovného vývěru vody z odpadní šachty. Největší rozmezí působících tlaků pak bylo naměřeno u variant 5 a 6, tedy variant s použitím usměrňovačů proudění. V tomto případě lokálně docházelo až k trojnásobnému nárůstu tlaku oproti variantě bez jejich použití. Srovnání pulzačních tlaků v odpadní šachtě je pouze v jejich průměrných hodnotách. Přepočtení tlaků a pulzačních tlaků na reálné vodní dílo dává dobrý obraz o nežádoucích pulzacích, v některých případech až nereálných hodnotách podtlaků. Zde je potřeba podotknout, že se jedná o turbulentní směs vody plus vzduch a tudíž měření tlaku (podtlaku) vodního sloupce by bylo vhodnější nahradit úrovní hladiny (která bohužel není v tomto systému pozorovatelná).



Obr 6: Průběh tlaků - sonda 11 - varianta 3

Zajímavé informace poskytlo i propojení výsledků jednotlivých na sebe navazujících sond. Jako příklad je uveden graf znázorňující průběh tlaků u sond 1, 5 a 9, tedy sond umístěných na spodní části odpadní šachty. Tyto hodnoty odpovídají průměrné hodnotě, které se vyskytly za celkový měřený čas pro daný průtok a sondu. Z obr 7 je patrné, že při vyšších průtocích dochází ve vstupní části k podtlakům, v ohybu pak k přetlakům a před rozšířením před vodorovnou odpadní štolou k velmi výrazným podtlakům. Dochází tak ke značnému namáhání celé odpadní soustavy.



Obr 7: Průběh tlaků sond 1, 5, 9 - varianta 4

Závěr

V rámci výzkumu šachtového přelivu na vodním díle Les Království byl postaven model v měřítku 1:36,04. Cílem bylo analyzovat chování a kapacitu přelivu za různých technických úprav, porovnat tyto hodnoty s výsledky získanými analytickou metodou a vyhodnotit a podrobněji poznat tlakové poměry v odpadní šachtě.

K určení shody kapacity dosažené modelem a výpočtem se použily konzumční křivky. Ty potvrdily relativně odpovídající výsledky, avšak poukázaly i na určité skutečnosti, které jsou významné pro výslednou kapacitu přelivu (tvar skutečného terénu, zakřivení proudnic u opěrné zdi, nerovnoměrné rozložení nátoků do šachtového přelivu, umístění česlí, usměrňovací prvky). Jedná se především o vliv usměrňovacích prvků na začátku šachty. Modelem bylo zjištěno, že levotočivé zakřivení mělo oproti pravotočivému znatelný vliv na snížení kapacity bezpečnostního přelivu a to až o 30 %. Toto snížení kapacity je připisováno na vrub půdorysně nesymetrického zpětného ovlivnění vody proudící v odpadním koleně i s ohledem na nerovnoměrný nátok na přelivnou hranu. Stejně tak měla nepříznivý vliv i instalace desky zamezující svislé proudění kolem přelivu. Tento rozdíl se však pohyboval již pouze kolem 5 %.

Díky nainstalovaným piezometrickým sondám se získala podrobná data o průběhu tlaků v odpadní šachtě. Byla lokalizována nejzatíženější místa, kterým je především konec odpadní šachty před jejím rozšířením. Naopak tlakově nejméně namáhaná místa byla identifikována za vstupní částí do šachty bezpečnostního přelivu. Celkově největším tlakům je pak odpadní šachta

vystavena při použití usměrňovačů proudění, kdy byly místy naměřeny hodnoty tlaků až třikrát větší než v případě bez jejich použití. Tento vyšší tlak přispívá k celkové tlakové stabilitě, kdy je menší možnost vzniku tlakových pulzací a vzniku nežádoucích podtlaků.

Poděkování:

Tento článek byl napsán za finančního přispění Ministerstva kultury České republiky grantového projektu č. DF11P01OVV009 „Metodika a nástroje ochrany a záchrany kulturního dědictví ohroženého povodněmi“.

Použitá literatura

- [1] Broža, V.: Přehrady Čech, Moravy a Slezska. Vyd. 1. Liberec: Knihy 555, 2005.
- [2] Falvey, H. T.: Air-water flow in hydraulic structures, Colorado, 1980.
- [3] Kolář, V., Patočka, C., Bém, J.: Hydraulika. Praha: SNTK, 1983.
- [4] POVODÍ LABE s. p.: Manipulační řád vodního díla na Labi Les Království. Hradec Králové, 2012.
- [5] Sikora, A.: Výskum zavzdušnenia šachtových priepadov, Bratislava, 1964.
- [6] Králík, M.: Bezpečnostní přelivy kamenných přehrad a extrémní povodně, Stavební obzor 3, Praha, 2012.
- [7] Dvořák L., Říha J., Zachoval Z.: Modelování proudění v předpolí bočního hrázového přelivu, Stavební obzor 1, Praha, 2012.
- [8] Čábelka J., Gabriel P.: Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice. 1. vydání. Praha: Academia, 1987.