

# Metodika zajištění bezpečnosti historických vodních děl při povodních

Identifikační kód projektu: **DF11P01OVV009**

## Průvodní zpráva k metodice

Poskytovatel: Česká republika - Ministerstvo kultury

Příjemce-koordinátor: České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta stavební





## Obsah

<b>I. CÍL METODIKY .....</b>	<b>5</b>
<b>II. VLASTNÍ POPIS METODIKY .....</b>	<b>7</b>
II.1 ROLE FYZIKÁLNÍHO MODELOVÁNÍ PŘI ZVYŠOVÁNÍ BEZPEČNOSTI HISTORICKÝCH VODNÍCH DĚL .....	7
II.2 HYDRAULICKÉ MODELY .....	9
II.2.1 Fyzikální hydraulický model .....	9
II.2.2 Měřítka hydraulického modelu .....	10
II.2.3 Doporučení pro volbu vhodného měřítka hydraulického modelu .....	11
II.3 MODELOVANÉ PRVKY HISTORICKÝCH VODNÍCH DĚL .....	12
II.4 SLEDOVANÉ VELIČINY NA MODELU A ZPŮSOB JEJICH MĚŘENÍ .....	13
II.4.1 Měření hladin .....	13
II.4.2 Měření rychlostí proudění .....	13
II.4.3 Měření tlaků .....	13
II.4.4 Deformace dna .....	14
II.4.5 Měření dynamického chování a chvění ocelových konstrukcí v kontaktu s vodou .....	14
II.5 TECHNOLOGIE A MATERIÁLY PRO VÝSTAVBU MODELŮ VODNÍCH DĚL .....	14
II.6 POSTUP PŘI ZÁMĚRU UPLATNIT FYZIKÁLNÍ MODELOVÁNÍ PRO ZVÝŠENÍ BEZPEČNOSTI VODNÍHO DÍLA .....	16
<b>III. SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ .....</b>	<b>17</b>
<b>IV. POPIS UPLATNĚNÍ CERTIFIKOVANÉ METODIKY .....</b>	<b>18</b>
IV. 1 VD HARCOV .....	18
IV.2 VD HVĚZDA .....	20
IV.3 VD LES KRÁLOVSTVÍ .....	22
IV.4 VD LABSKÁ .....	24
<b>V. EKONOMICKÉ ASPEKTY .....</b>	<b>25</b>
<b>VI. SEZNAM POUŽITÉ SOUVISEJÍCÍ LITERATURY .....</b>	<b>26</b>
<b>VII. SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE .....</b>	<b>27</b>
<b>PŘÍLOHA .....</b>	<b>30</b>



## Identifikační údaje:

Poskytovatel: **Česká republika – Ministerstvo kultury**  
Maltézské náměstí 1  
118 11 Praha 1

Program: **Program aplikovaného výzkumu a vývoje národní kulturní identity (NAKI)**

Projekt: **Metodika a nástroje ochrany a záchrany kulturního dědictví ohroženého povodněmi**

Identifikační kód projektu: **DF11P01OVV009**

---

Koordinující příjemce: **České vysoké učení technické v Praze**  
Žitná 4, 166 36 Praha 6

odpovědný řešitel: doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur

autoři metodiky: Ing. Miroslav Brouček, Ph.D.  
doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur  
Ing. Martin Králík, Ph.D.  
doc. Ing. Ladislav Satrapa, CSc.  
Ing. Milan Zukal, Ph.D.

kontakt: email: [fosumpaur@fsv.cvut.cz](mailto:fosumpaur@fsv.cvut.cz)  
Tel.: 224 354 425, 604 159 727



## Metodika zajištění bezpečnosti historických vodních děl při povodních

Metodika vznikla v roce 2015 v rámci řešení projektu NAKI identifikační kód projektu: DF11P01OVV009 „Metodika a nástroje ochrany a záchrany kulturního dědictví ohroženého povodněmi“, financovaném Ministerstvem kultury ČR na základě smlouvy č. 9/2011/OVV.

Autorem metodiky je řešitelský kolektiv ČVUT v Praze, Fakulty stavební ve složení:

Ing. Miroslav Brouček, Ph.D.  
doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur  
Ing. Martin Králík, Ph.D.  
doc. Ing. Ladislav Satrapa, CSc.  
Ing. Milan Zukal, Ph.D.

### Oponenti:

- 1) Ing. Petr Bouška, Ph.D., Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v.v.i.  
Podbabská 2583/30, 160 00 Praha 6
- 2) Ing. Pavel Marták, Ministerstvo životního prostředí, odbor ochrany vod,  
oddělení ochrany před povodněmi  
Vršovická 65, 100 10 Praha 10

### Anotace

Metodika slouží pro zdokonalení stávajících postupů při zvyšování bezpečnosti historických vodních děl při povodních metodami hydraulického modelování na fyzikálních modelech. Metodika reaguje na aktuální potřebu zvyšování kapacit funkčních objektů vodních děl dle významně zvýšených bezpečnostních požadavků dle platné legislativy. Metodika je obecně platná také pro případy vodních děl, která nemají statut kulturních památek. V případě historických vodních děl je třeba přistupovat k jejich rekonstrukcím citlivě z důvodu zachování jejich kulturně historického charakteru. Metody hydraulického výzkumu umožňují nejspolehlivější modelovací nástroj pro ověřování stávajících kapacit funkčních objektů a optimalizaci navržených rekonstrukcí s minimálními dopady na charakter památkově chráněných staveb.

### Klíčová slova

zvyšování bezpečnosti vodních děl; povodně; hydraulický výzkum; spolehlivost vodních děl



## I. Cíl metodiky

Zákon o vodách (254/2001 Sb.) obsahoval již v předchozí právní úpravě (138/1973 Sb.) podrobný výčet povinností a oprávnění vlastníků a správců vodních děl. Mezi základní povinnosti patří udržovat vodní díla v trvale dobrém a provozuschopném stavu, aby nedošlo k ohrožení bezpečnosti osob a majetku. Pro plnění těchto úkolů slouží odborná činnost, kterou pod pojmem technickobezpečnostní dohled (TBD) blíže upravuje prováděcí vyhláška Ministerstva zemědělství č. 471/2001 Sb., o TBD nad vodními díly, ve znění vyhlášky č. 255/2010 Sb. Povinnost posouzení bezpečnosti vodního díla při povodních vyplývá rovněž z technických požadavků pro vodní díla ve smyslu vyhlášky č. 590/2002 Sb. ve znění pozdějších předpisů.

V rámci zajištění bezpečnosti vodních děl při povodních je klíčová hydraulická kapacita jejich funkčních objektů (bezpečnostní přeliv a spodní výpusti). Kapacita funkčních objektů byla v minulosti řešena na podkladě normy ČSN 73 6814 (Navrhování přehrad) schválené 29.6.1972. Na základě této normy bylo třeba navrhnout kapacitu funkčních objektů na tzv. návrhovou povodňovou vlnu (NPV), která byla ve většině případů rovna přirozené povodni s dobou opakování 100 let. Dále bylo třeba přešetřit bezpečné provedení tzv. kontrolní povodňové vlny (KPV) s dobou opakování 1000 let.

V návaznosti na zvýšenou povodňovou aktivitu od roku 1997 a v souladu se zohledněním zahraničních zkušeností však došlo k výraznému zvýšení bezpečnostních standardů při posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních. Výsledkem těchto aktivit byl nejprve metodický pokyn č. 4/1999 odboru ochrany vod Ministerstva životního prostředí k posuzování bezpečnosti přehrad za povodní. Účelem pokynu bylo dosažení přiměřené bezpečnosti přehrad na území České republiky v souladu s doporučením Mezinárodní přehradní komise (ICOLD) ve srovnatelné míře jako ve vyspělých zemích, dále pak formulace zásad a požadavků na bezpečnostní kritéria přehrad za povodní.

Od srpna 2003 byla pak tato problematika řešena odvětvovou normou TNV 75 2935 „Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních“, která byla nahrazena v lednu 2014 normou ČSN 75 2935. Na tuto úpravu reaguje nová norma „Navrhování přehrad“ ČSN 75 2340 z října 2004. Zvýšení bezpečnostních standardů představuje významné zvýšení kulminačních hodnot NPV a také KPV. Doba opakování kontrolní povodňové vlny (KPV) se v důsledku tohoto opatření zvýšila řádově, kdy v závislosti na kategorii vodního díla dle TBD může činit až 10 000 let (z původní doby opakování max. 1000 let). Ve svém důsledku to znamená, že existující přehrady včetně těch historických musí dle platné legislativy umožnit bezpečné převedení až 10 000 leté povodně. Toto bezpečnostní ustanovení normy ČSN 75 2935 je přitom závazné, neboť jej vyžaduje současně vyhláška Ministerstva zemědělství č. 590/2002 Sb. „o technických požadavcích pro vodní díla“.

Důsledkem uvedeného zvýšení požadovaných bezpečnostních standardů kladených na významné vzdouvací stavby (přehrady) je skutečnost, že některé z nich je nejsou schopny v současnosti splnit, protože byly navrženy a realizovány dříve s tehdy platnými mírnějšími požadavky na bezpečnost. Týká se to zejména historických vodních děl, z nichž



některé mají statut kulturní památky dle zákona o státní památkové péči 20/1987 Sb. ve znění pozdějších předpisů. Správci těchto vodních děl jsou proto v souladu s požadavkem vodního zákona povinni zajistit jejich bezpečnost, což postupně činí prostřednictvím realizace nápravných opatření.

Smyslem posouzení bezpečnosti vodních děl při povodních je porovnání tzv. kontrolní maximální hladiny (KMH) a mezní bezpečné hladiny (MBH). Poloha KMH závisí zejména na průběhu kontrolní povodňové vlny s danou kulminací (zvolenou dle významu vodního díla ve vazbě na jeho kategorii dle TBD a pravděpodobnosti ohrožení lidských životů) a na dalších charakteristikách vodního díla zejména kapacitě funkčních objektů (bezpečnostní přeliv a spodní výpusti). MBH představuje polohu hladiny, při jejímž překročení je pravděpodobná destrukce hráze a vznik zvláštní povodně. Poloha MBH je determinována zejména konstrukčním řešením a materiálovou charakteristikou tělesa hráze a podloží.

Obecně nápravná opatření pro zvýšení bezpečnosti vodních děl při povodních představují zejména zvyšování kapacity funkčních objektů, které ve svém důsledku vede na snížení KMH a popřípadě opatření s cílem zvyšování MBH.

V případě historických vodních děl je realizace nápravných opatření často významně limitována jejich statusem kulturní památky dle zákona č. 20/1987 Sb. Z uvedeného důvodu je třeba k nápravným opatřením přistupovat citlivě a hledat řešení, která zajistí splnění nových bezpečnostních standardů při současném zachování jejich kulturně historické hodnoty.

Cílem předložené metodiky je proto návrh metodického postupu, který umožňuje zvyšování bezpečnosti historických vodních děl, a to zejména zvyšováním kapacity jejich funkčních objektů na podkladě hydraulického modelování pomocí fyzikálních modelů ve vodohospodářských laboratořích. Tato potřeba je vyvolána zejména obecným faktem, že funkční objekty historických vodních děl jsou často poměrně komplikované a odvození jejich kapacity matematickými postupy je zatíženo značnou neurčitostí. Současně se zpravidla jedná o stavby, pro jejichž návrh popř. rekonstrukce tato technologie dosud nebyla využita.



## II. Vlastní popis metodiky

### II.1 Role fyzikálního modelování při zvyšování bezpečnosti historických vodních děl

Bezpečnost vodního díla za povodně, tj. schopnost spolehlivě převést kontrolní povodeň bez rizika vzniku zvláštní povodně, je obecně funkcí odezvy vodního díla a charakteristik kontrolní povodně, v konečném důsledku vyčíslenou kótou kontrolní maximální hladiny (KMH), a souborem vlastností příslušného vodního díla, které reprezentuje poloha mezní bezpečné hladiny (MBH). Při binárním chápání spolehlivosti se tedy posouzení bezpečnosti redukuje na nerovnost mezní bezpečné hladiny a kontrolní maximální hladiny.

Technické požadavky na bezpečnost historických vodních děl byly v době jejich výstavby značně odlišné od současné legislativy. Nezřídká je tedy na základě nevyhovujícího posouzení zapotřebí přistoupit ke zvýšení bezpečnosti vodního díla, a to buď snížením kontrolní maximální hladiny, nebo zvýšením mezní bezpečné hladiny, případně kombinací obojího v návaznosti na posouzení technicko-ekonomické náročnosti jednotlivých variant.

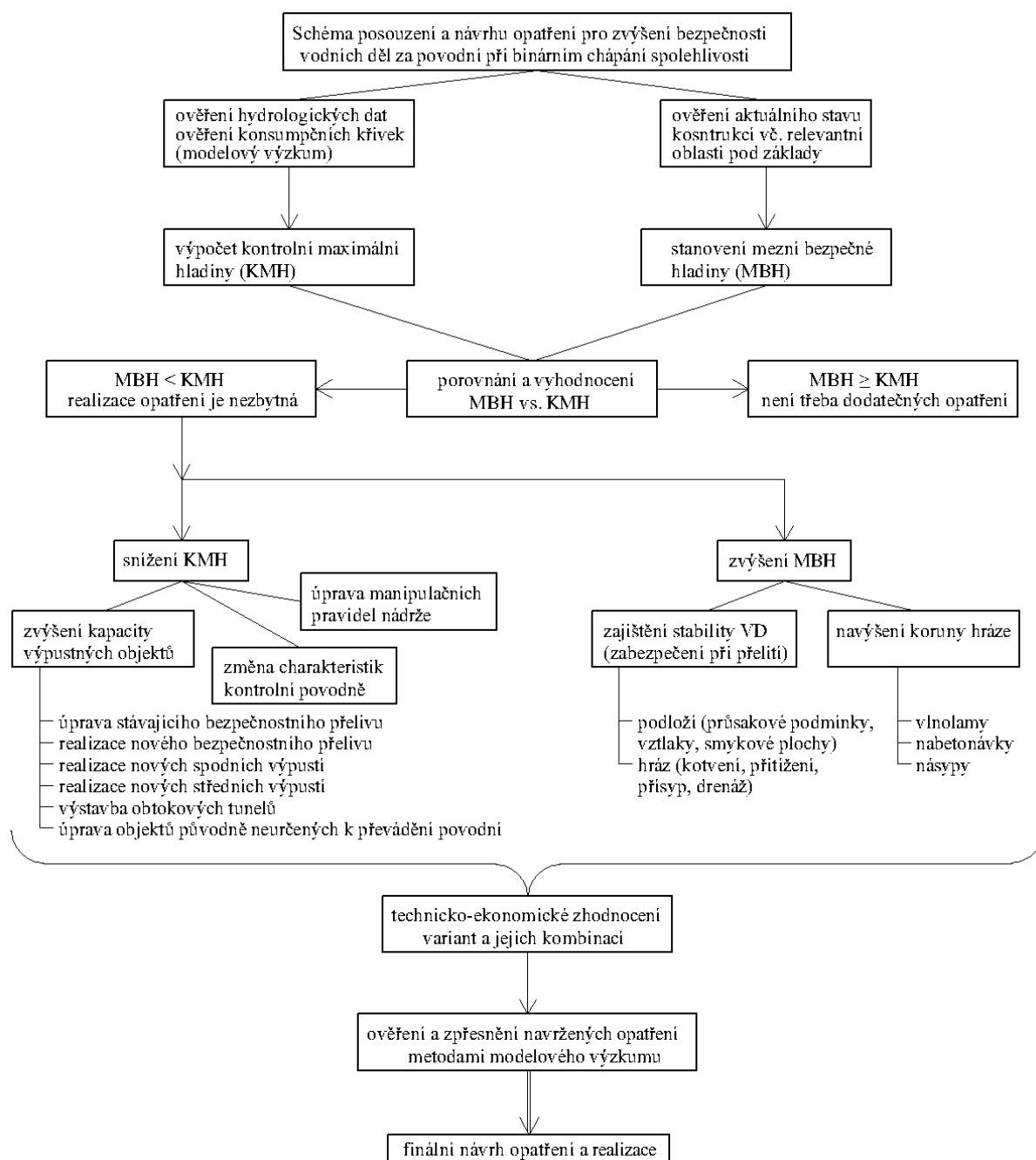
Možnosti pro zvýšení úrovně MBH jsou zásadně navázané na typ a materiál hráze, zatímco poloha KMH je ponejvíce ovlivněna kapacitou výpustných zařízení v profilu hráze, přičemž parametry nádrže a charakteristiky kontrolní povodně představují obvykle vstupní údaje, které lze měnit jen za specifických podmínek (malá plocha povodí, specifické morfologické podmínky umožňující převod vody do jiného povodí atd.).

Vzhledem k významné ekonomické náročnosti jednotlivých opatření pro zvýšení bezpečnosti je zcela nezbytné, aby vstupní údaje byly na aktuální úrovni poznání. Zásadní jsou jednak případné změny v hydrologických podkladech a dále přesné vyjádření konsumpčních křivek jednotlivých výpustných objektů, které se od projekčních předpokladů může významně lišit. Ověření kapacity a konsumpčních křivek bezpečnostních přelivů na fyzikálních modelech je pro vodní díla s méně obvyklým uspořádáním naprosto nezbytnou podmínkou pro další návrh technických opatření. Neméně důležité je ověření skutečného stavu konstrukcí včetně podzákladí (například u sypaných hrází se vlivem konsolidace i dalších procesů nenachází těsnicí jádro na stejné úrovni v celé délce hráze, u historických zděných hrází není dobře zaznamenáno rozdělení vztlaků na základové spáře, apod.).

Celý postup ověření a zvýšení bezpečnosti vodních děl za povodní, platný nejen pro historická vodní díla, shrnuje následující schéma na obr. 1. S potřebou omezit zásahy do konstrukce respektive vzhledu vodních děl s ohledem na jejich kulturně-historickou hodnotu dále narůstá význam hydraulického modelování na fyzikálních modelech, neboť umožňuje upřesnit projekční předpoklady u navrhovaných úprav a tedy i omezit rozsah případných úprav. Jednotlivé části schématu, respektive úlohy a zapojení modelového výzkumu, jsou níže podrobněji komentovány.

### 1) Úloha modelového výzkumu při ověření vstupních údajů pro výpočet KMH

Konsumpční křivky bezpečnostních přelivů a výpustných zařízení obecně jsou u historických vodních děl určeny základními hydrotechnickými výpočty, které mnohdy nejsou schopny dobře postihnout složitější hydraulické jevy na přelivech, například zahlcování způsobené sníženou mostovkou, ve spadištích bočních či šachtových přelivů, například rozvlnění hladiny či šroubovitě proudění, a dále na skluzech či v odpadních korytech, kde vlivem tvarového uspořádání dochází často k tvorbě vln, provzdušnění proudu i změně kapacity. Přestože část úlohy může převzít numerická aproximace, vlivem chybějících kalibračních údajů je třeba preferovat laboratorní hydraulický model splňující příslušná kritéria modelové podobnosti.



Obr. 1 Postup posouzení a zvýšení bezpečnosti vodních děl při povodních.





## **2) Úloha modelového výzkumu při volbě možných úprav výpustných objektů**

Ve specifických případech lze úspěšně využít laboratorního modelu vodního díla k ověření hydraulických podmínek možných úprav ještě před provedením technicko-ekonomického zhodnocení pro zrychlení rozhodovacího procesu a vyloučení nebo zapojení úprav, které by s ohledem na kulturně-historickou hodnotu díla jinak nebyly brány v potaz (např. VD Harcov – rok výstavby 1904, VD Mšeno – rok výstavby 1909).

## **3) Úloha modelového výzkumu při ověření správného fungování navržených úprav**

Místní podmínky u stávajícího vodního díla jsou určujícím faktorem pro možná technická opatření na výpustných zařízeních a v jejich důsledku může být výsledný návrh po stránce hydraulických podmínek velmi komplikovaný (např. VD Hvězda – rok výstavby 1378). Při ověření správné hydraulické funkce nově navržených úprav má fyzikální modelování zcela nezastupitelnou roli.

## ***II.2 Hydraulické modely***

Základní motivací pro aplikaci metod hydraulického výzkumu je rozsah, finanční náročnost a individuální charakter vodních děl. Hydraulický výzkum je významnou součástí předprojektové přípravy významných vodních staveb včetně jejich rekonstrukcí za účelem zvyšování jejich bezpečnosti při povodních. Náklady na výzkum jsou zpravidla řádově nižší než dodatečné úpravy konstrukcí, popř. zvýšené provozní náklady. Mezi základní prostředky hydraulického výzkumu patří metody matematického a fyzikálního modelování.

Matematické modely využívají pro úlohy optimalizace tvarového řešení vodních děl numerickou aproximaci Navier-Stokesových pohybových rovnic a rovnice kontinuity. Pro simulaci turbulentního proudění je v praktických aplikacích často používán některý turbulentní model, např.  $k-\varepsilon$ . Nezastupitelnou roli při výzkumu vodních staveb mají fyzikální modely. To je dáno existencí řady hydrodynamických jevů, jejichž simulace prostřednictvím numerických modelů není dostatečně spolehlivě dořešena. Mezi takovéto problémy lze zařadit 3D turbulentní proudění vody s volnou hladinou, splaveninový režim a deformace dna v okolí objektů vodních děl.

### **II.2.1 Fyzikální hydraulický model**

Cílem předložené metodiky je formulovat principy využití technologie hydraulického výzkumu v rámci zvyšování bezpečnosti historických vodních děl na fyzikálních modelech. Fyzikální modelování je založeno na podobnosti hydrodynamických jevů mezi dvěma reálnými systémy, z nichž jeden představuje skutečnost (prototyp) a druhý jeho zobrazení (model). Pro zobrazení skutečnosti na modelu se vychází zpravidla z předpokladu, že v obou případech se jedná o existenci dvou fyzikálně stejnorodých jevů, kdy na modelu se využívá stejného média jako ve skutečnosti.

Obecné zákony mechanické podobnosti hydrodynamických jevů na zmenšeném modelu a ve skutečnosti lze odvodit z matematického popisu proudění (rovnice Navier-Stokesovy) nebo z rozměrové analýzy příslušného hydrodynamického jevu. Ve výzkumu vodních



staveb se nejčastěji uplatní **Froudův zákon** mechanické podobnosti, u kterého jsou podmínky mechanické podobnosti hydrodynamických jevů vyjádřeny za výhradního působení gravitačních sil. Kinematicky podobné jevy, které ovlivňuje výhradně gravitační síla, jsou dynamicky podobné, jestliže ve vzájemně příslušných průřezech budou stejná Froudova čísla:

$$Fr = \frac{v_s^2}{g \cdot l_s} = \frac{v_m^2}{g \cdot l_m} = \text{idem} \quad (1)$$

kde  $v$  je rychlost proudění vody a  $l$  je délkový rozměr ve skutečnosti, resp. na modelu. Kromě gravitačních sil však mohou zkoumané proudění ovlivňovat i další síly – odpor třením vazké kapaliny, síly kapilární, síly objemové pružnosti apod. Podle Froudova zákona podobnosti můžeme určitý hydrodynamický jev zkoumat tehdy, jestliže účinky těchto sil jsou zanedbatelné v porovnání s gravitačními silami. Mezní podmínky vymezují oblasti a měřítko, v nichž lze hydrodynamický jev modelovat. Kromě těchto podmínek je třeba dodržet na modelu stejný režim turbulentního proudění jako ve skutečnosti, kdy proudění musí být v kvadratické oblasti, kde ztráty třením již nejsou funkcí Reynoldsova čísla.

## II.2.2 Měřítko hydraulického modelu

Z platnosti Froudova zákona lze odvodit tyto základní měřítko modelu:

- pro měřítko podobnosti průtoků

$$M_Q = M_B \cdot M_h^{3/2} \quad (2)$$

- pro měřítko podobnosti odporových součinitelů

$$M_f = M_{Ie} \quad (3)$$

- pro měřítko podobnosti sklonů

$$M_{Ie} = M_{Id} = M_h / M_l \quad (4)$$

- pro měřítko podobnosti středních průměrů zrn (s použitím rovnice Meyer-Petera pro začátek pohybu splavenin)

$$M_d = (M_h \cdot M_{Ie}) / M_{\gamma s} \quad (5)$$

- pro měřítko podobnosti rychlostí

$$M_v = M_h^{1/2} \quad (6)$$

- pro měřítko podobnosti časů při proudění vody

$$M_t = M_l / M_h^{1/2} \quad (7)$$

- pro měřítko podobnosti Reynoldsových čísel (při stejné teplotě vody na modelu a ve skutečnosti -  $M_v = 1$ )

$$M_{Re} = M_h^{3/2} \quad (8)$$



V těchto rovnicích značí:  $M_Q$  - poměr průtoků,  $M_h$  - poměr hloubek,  $M_l$  - poměr délek,  $M_B$  - poměr šířek,  $M_f$  - poměr odporových součinitelů,  $M_{Ie}$  - poměr sklonů čar energie,  $M_{Id}$  - poměr sklonů dna,  $M_d$  - poměr středních průměrů zrn,  $M_{\gamma s'}$  - poměr specifických hmotností splaveninového materiálu pod vodou,  $M_v$  - poměr rychlostí,  $M_t$  - poměr časů při proudění vody a  $M_{Re}$  - poměr Reynoldsových čísel.

U modelu s pohyblivým dnem tvoří další skupinu podmínky podobnosti, odvozené z rovnic Meyer-Petera pro začátek pohybu a pohyb splavenin:

- pro měřítko podobnosti specifických průtoků splavenin

$$M_{gs'} = M_h^{3/2} \cdot M_{Ie}^{3/2} \quad (9)$$

- pro měřítko podobnosti celkových průtoků splavenin daným profilem

$$M_{Gs'} = M_{gs'} \cdot M_B \quad (10)$$

- pro měřítko podobnosti časů při pohybu splavenin

$$M_t = (M_l \cdot M_{\gamma vol'}) / (M_h^{1/2} \cdot M_{Ie}^{3/2}) \quad (11)$$

kde  $M_{\gamma vol'}$  je poměr objemových hmotností splavenin pod vodou.

### II.2.3 Doporučení pro volbu vhodného měřítka hydraulického modelu

Pro zajištění spolehlivých výsledků výzkumu na hydraulických modelech v laboratoři je třeba vyjít z následujících aspektů:

- a) Mezní podmínky mechanické podobnosti – dodržení mezních podmínek modelové podobnosti je nezbytné z hlediska dosažení věrohodných výsledků, tedy přenositelnosti výsledků z modelu na chování prototypu.
- b) Kapacita hydraulického obvodu laboratoře – jedná se zejména o porovnání disponibilního výkonu čerpadel v rámci hydraulického okruhu vodohospodářské laboratoře s požadovaným průtokovým množstvím pro simulaci daného jevu v daném měřítku mechanické podobnosti.
- c) Rozměrové možnosti laboratoře – jedná se o porovnání potřebného rozsahu hydraulického modelu v daném měřítku s disponibilním prostorem ve vodohospodářské laboratoři.

Mezní podmínky pro modelování podle Froudova zákona mechanické podobnosti jsou dány principem modelování, kdy převažují gravitační síly – ostatní síly (odpor tření vazké kapaliny, kapilární síly, síly objemové pružnosti atd.) jsou malé a pro tento typ modelování zanedbatelné. Toto zanedbání je možno udělat při dodržení mezních podmínek. Při modelování jevů proudění podle Froudova zákona se může uplatnit povrchové napětí vody. Povrchové napětí se neuplatní tehdy, pokud je přepadová výška na modelu  $h \geq 20$  mm. Pokud je  $h \leq 20$  mm pak přechází tvar přepadajícího paprsku vlivem kapilárních sil téměř do přímky. Povrchová rychlost proudu na objektových modelech má být  $u \geq 230$  mm.s<sup>-1</sup>, aby kapilární síly nebránily tvoreni povrchových vln vlivem gravitačních sil. Při modelování podle Froudova zákona 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 výtakového 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 Froudova zákona 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.

Kromě těchto podmínek je třeba dodržet na modelu stejný režim turbulentního proudění jako ve skutečnosti, kdy proudění musí být v kvadratické oblasti, kde ztráty třením již nejsou funkcí Reynoldsova čísla.

### **II.3 Modelované prvky historických vodních děl**

Přestože lze v principu zhotovit model celého vodního díla včetně nádrže, v praktických úlohách je vhodné omezit rozsah fyzikálního modelu na jednotlivé prvky, které ovlivňují hydraulickou kapacitu profilu. Stejně jako v podmínkách matematického modelování je nezbytné formulovat okrajové podmínky zkoumané oblasti tak, aby věrně aproximovaly chování skutečného vodního díla či jeho částí. Příkladem může být výsekový model nehrazeného bezpečnostního přelivu, jehož kapacitu ovlivňuje nízko posazená dolní mostovka, která musí být do modelu zahrnuta, nicméně zajímá-li nás pouze konsumpční křivka přelivu, je model vývaru a dolní části skluzu zcela nadbytečný.

Mohou-li některé části vodního díla participovat na hydraulickém jevu jiného prvku, je účelné modelovat oba prvky v jednom funkčním celku. Příkladem mohou být spodní výpusti zaústěné do odpadní chodby šachtového přelivu, jehož chování pak zpětně ovlivňují. Stejně tak sousedící pole bezpečnostních přelivů s jiným tvarem nebo přemostěním. Typické prvky, jejichž modelový výzkum lze účelně v rámci zvyšování bezpečnosti historických vodních děl provádět jsou:

- a) bezpečnostní přelivy – všech typů a uspořádání (korunový, boční, šachtový; dle funkce pak hrazený nebo nehrazený)
- b) spadiště bezpečnostních přelivů, skluzu od bezpečnostního přelivu a odpady,
- c) zakrytý profil nad přelivem nebo spadištěm (mostovka)
- d) spodní výpusti, odpady od spodních výpustí,
- e) vývar pod přelivem nebo pod výpustí – v souvislosti se stabilitou paty vzdouvací stavby s využitím pohyblivého dna na modelu.



## **II.4 Sledované veličiny na modelu a způsob jejich měření**

### **II.4.1 Měření hladin**

Měření polohy hladin je při hydraulickém výzkumu bezpečnosti vodních děl nejdůležitější, a to zpravidla pro určení polohy kontrolní maximální hladiny (KMH) při převádění kontrolní povodňové vlny (KPV). Pro měření hladin se zpravidla v současnosti využívají následující technologie:

- a) Měření hladin na základě principu spojitých nádob. V zájmových bodech hydraulického modelu se rozmístí piezometrické odběry, které jsou následně vyvedeny do skleněných nebo platových válců na přístupném místě. Princip měření je založen na principu spojitých nádob, kdy volná hladina v měřících válcích zaujme stejnou polohu jako volná hladina v místě odběru na modelu. Odečet hladiny v měrném válci je pak možné realizovat např. pomocí hrotového měřítka s odečtem na desetiny milimetru.
- b) Měření hladin pomocí hrotového měřítka upevněného na nosníku, který se ručně posunuje po vodorovných kovových lištách osazených po obou stranách modelu. Kovové lišty je napřed třeba geodeticky osadit do vodorovné polohy pomocí velmi přesné nivelace.
- c) Tlakové sondy.
- d) Ultrazvukové sondy.
- e) Měření elektrického potenciálu vodního sloupce mezi dvěma souběžnými vertikálními vodiči, z nichž jeden je napájen střídavým proudem z obou stran o vyšší frekvenci. Snímá se napětí proti jednomu z konců napájeného vodiče, přičemž snímané napětí je funkcí výšky hladiny vody.

### **II.4.2 Měření rychlostí proudění**

Rychlosti proudění jsou významným ukazatelem pro kvantifikaci namáhání obtékaných konstrukcí hydrodynamickým tlakem, rizika vzniku kavitačních jevů a účinnosti opatření pro tlumení kinetické energie. Pro měření rychlostí lze využít následující technologie:

- a) střední rychlosti proudění pomocí korkových plováček zaměřením času jejich průchodu jednotlivými úseky modelu;
- b) bodové rychlosti ve zvolených místech modelu pomocí ultrazvukové sondy;
- c) bodové rychlosti ve zvolených místech modelu pomocí mikrokřídla ponořovaného do hloubky odpovídající požadované hloubce ve skutečnosti.
- d) pomocí progresivních moderních metod na principu Particle Image Velocimetry (PIV).

### **II.4.3 Měření tlaků**

Měření tlaků slouží pro kvantifikaci namáhání obtékaných konstrukcí hydrostatickým a hydrodynamickým tlakem a rizika vzniku kavitačních jevů (podtlaky na přelivných a jiných konstrukcích). Pro měření tlaků lze využít standardního přístupu piezometrických odběrů popř. komerčně dostupné tlakoměry.



#### **II.4.4 Deformace dna**

Měření deformací dna při posuzování bezpečnosti vodních děl je zásadní zejména s ohledem na vyšetření stability vzdouvacích konstrukcí ve vazbě na riziko vzniku výmolů na vzdušní patě. Tyto výmoly mohou vznikat v prostoru vývaru pod funkčními objekty, za vývarem popřípadě také mimo vodohospodářský vývar při přepadu vody přes snížené části koruny vzdouvacích staveb při převádění kontrolní povodňové vlny. Jako základní prostředek k zaměřování konfigurace dna je používáno hrotové měřítko upevněné na nosníku a ručně posunované po vodorovných kovových lištách, osazených po obou stranách modelu.

Mezi progresivní postupy ověřování rozsahu výmolů a nánosů na modelu s pohyblivým dnem lze označit metodu laserového skenování, která byla na pracovišti navrhovatele metodiky pro tyto účely navržena a otestována.

#### **II.4.5 Měření dynamického chování a chvění ocelových konstrukcí v kontaktu s vodou**

Jedná se zejména o dynamické namáhání uzávěrů na hrazených bezpečnostních přelivech přehrad. Ve vodohospodářské praxi jsou časté případy nechtěných vibrací jednotlivých stavebních a strojních částí. Tyto vibrace jsou nepříjemné z hlediska šíření zvukové vlny do okolí a potenciálně nebezpečné z hlediska negativního ovlivnění okolních částí a z hlediska vlivu na cyklickou únavu materiálu.

### ***II.5 Technologie a materiály pro výstavbu modelů vodních děl***

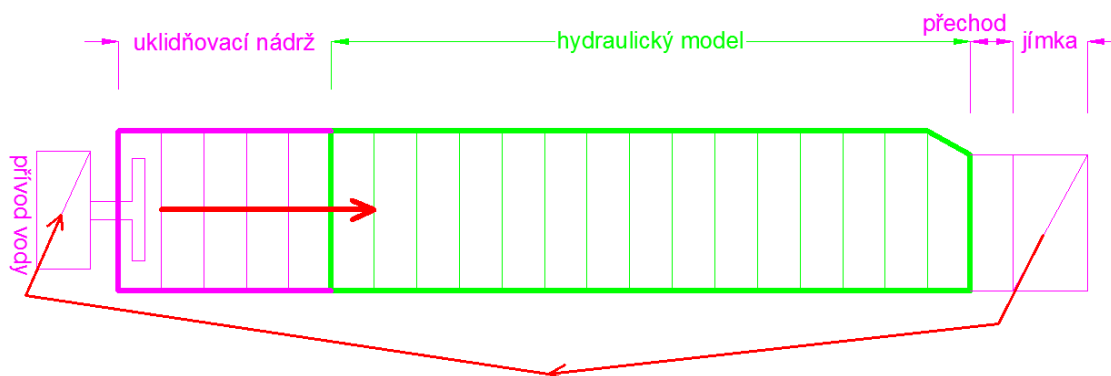
Realizace hydraulického modelu probíhá zpravidla ve vhodně vybavené vodohospodářské laboratoři, která disponuje minimálně následujícími základními prvky:

- a) hydraulický okruh,
- b) čerpadlo,
- c) měření průtoku,
- d) nátok do modelu a tlumení na přítoku do modelu,
- e) svedení odpadu do hydraulického okruhu.

Hydraulický okruh laboratoře je buď vlastní (obr. 2) nebo centrální. Centrální okruh je častější a představuje existenci centrální čerpací jímky a výkonného čerpadla (čerpadel), která vodu v hydraulickém systému distribuují do tlakové nádrže opatřené přepadovými žlábkami s cílem zajištění konstantního tlaku v rozvodném systému do laboratoře k jednotlivým hydraulickým modelům.

Pro měření průtoku na nátok do hydraulického modelu se používá zpravidla těchto technologií:

- a) měrné přelivy (např. Thomsonův měrný přeliv),
- b) Venturiho dýza s měřením průtoku na principu snímání tlaku před a za dýzou,
- c) indukční průtokoměry,
- d) ultrazvukové průtokoměry.



**Obr. 2** Schéma hydraulického modelu s vlastním hydraulickým okruhem.

Při měření na hydraulických modelech je z hlediska vytvoření požadovaných průtokových podmínek na modelu, které odpovídají dané zkoumané situaci v daném měřítku mechanické podobnosti, podstatné správné nastavení okrajových podmínek. Při výzkumu bezpečnosti historických vodních děl lze ve většině případů vystačit s těmito typy okrajových podmínek:

- horní okrajová podmínka – je zpravidla dána průtokem na počátku hydraulického modelu. Průtok je do modelu pouštěn v množství, které odpovídá danému měřítku dle vztahu (2).
- dolní okrajová podmínka – je zpravidla dána známou polohou hladiny na konci simulovaného úseku. Její nastavení se zpravidla realizuje pomocí za tím účelem sestrojeného uzávěru na konci modelu (velmi často klapka).

Materiály využívané pro výstavbu hydraulických modelů prodělaly v minulosti významný vývoj. Původní vesměs zednické a tesařské postupy jsou v současnosti nahrazovány moderními přístupy efektivní výstavby hydraulických modelů s cílem minimalizace nákladů na výstavbu a časovou náročnost. Pro výstavbu hydraulických modelů lze v současnosti využít:

- obtékané konstrukce vodních děl: PVC, polypropylen, extrudovaný polystyren. Tyto materiály se vyznačují snadnou opracovatelností, řezáním a nenáročným spojováním pomocí šroubových spojů nebo lepení a svařování (polypropylen). V případě využití extrudovaného polystyrenu je třeba pamatovat na zajištění modelovaných konstrukcí před hydrostatickým vztlakem. Tato dílčí nevýhoda je však zpravidla vyvážena neobyčejně snadnou opracovatelností materiálu např. pomocí odporového drátu.
- svahy nádrží a koryta vodních toků: jako velmi efektivní se v současnosti jeví realizace lehkého žlabu z polypropylenových desek, ve kterém je koryto vodního toku nebo nádrže vytvarováno pomocí betonové skořepiny uložené na připraveném podloží z keramzitu s oddělovací vrstvou syntetické perlinky. Na takto vytvořený podklad lze libovolně připevňovat konstrukce vodních děl, popř. nasypat pohyblivé dno z písku požadované frakce pro simulaci výmolů a deformací.



## **II.6 Postup při záměru uplatnit fyzikální modelování pro zvýšení bezpečnosti vodního díla**

Závěrem lze doporučit následující postup pro využití metody fyzikálního modelování v rámci ověřování postupů pro zvyšování bezpečnosti historických vodních děl při povodních:

- 1) Definice zkoumaných jevů – jednoznačné určení veličin, které budou sledovány (determinují typ modelové podobnosti i měřítko modelu a nezbytné přístrojové vybavení)
- 2) Určení rozsahu modelu – jak po stránce rozměrů příslušných prvků, tak i po stránce rozsahu zkoumaných průtoků (chyba měřících přístrojů je vždy závislá na rozsahu měření, dále jsou na model kladeny různé nároky na přesnost a odolnost)
- 3) Stanovení časové náročnosti výzkumu a kalkulace nákladů na laboratorní výzkum
- 4) Výstavba modelu s využitím dostupných technologií s odpovídající přesností
- 5) Ověření stávající stavu – zpětná vazba k předpokládanému hydraulickému jevu na daném prvku a případná kalibrace modelu oproti měření na skutečném vodním díle (dobře mohou posoudit fotografické materiály z průběhu povodní)
- 6) Návrh a optimalizace variant z hlediska zkoumaných veličin (zvýšená kapacita, omezení podtlaků, zlepšení tlumení kinetické energie, omezení příčných složek rychlostí, atd.)

Pro přehlednou dokumentaci hydraulického výzkumu a pro potřeby následné fáze projektové přípravy akce lze doporučit sestavení výzkumné zprávy, která bude mít osnovu v minimálním rozsahu dle následujícího členění:

- a) Cíl výzkumu,
- b) Popis laboratoře a jejího vybavení,
- c) Popis měřítka modelové podobnosti a doložení zachování podmínek mechanické podobnosti,
- d) Výsledková část,
- e) Interpretace a diskuze výsledků
- f) Závěry a doporučení





### III. Srovnání novosti postupů

Metody hydraulického výzkumu jsou v ČR a v zahraničí systematicky rozvíjeny od přibližně 30. let 20. století. Tyto postupy začaly být využívány pro spolehlivý návrh významných vodních děl zejména po druhé světové válce. Rozvoj technologie hydraulického modelování na fyzikálních modelech u nás byl podmíněn zejména publikacemi předních vědců v oboru hydrauliky a hydrotechniky.

Předložená metodika je v souladu s § 2, odst. 1, písm. b) a písm. c) zákona č. 130/2002 Sb. „o podpoře výzkumu, experimentálního vývoje a inovací“ výsledkem teoretické a experimentální práce zaměřené na získání nových poznatků a dovedností pro potřeby podstatného zdokonalení stávajících postupů v oblasti hydraulického výzkumu vodních děl se zaměřením na zvyšování bezpečnosti historických vodních děl při povodních. Přínos předložené metodiky ve srovnání se stávajícími postupy spočívá zejména v těchto aspektech:

- a) Navržené postupy jsou uplatňovány s ohledem na specifické postavení historických vodních děl, které vzhledem ke svému často památkově chráněnému charakteru vyžadují realizaci citlivých přístupů zvětšování kapacity funkčních objektů a dalších opatření zvyšování bezpečnosti při povodních, aby bylo možné zachovat jedinečné postavení kulturního dědictví pro příští generace.
- b) Systémy funkčních objektů a jejich součástí je třeba modelovat jako celek, neboť jsou ve vzájemných interakcích.
- c) Pro měření zásadních veličin z pohledu bezpečnosti VD doporučujeme využívat soudobou měřicí techniku a technologie. Na pracovišti navrhovatele byla vyvinuta původní technologie pro měření deformací dna na hydraulických modelech založená na laserovém skenování.
- d) Pro realizaci hydraulických modelů metodika doporučuje využití moderních metod a materiálů, jejichž využití významně snižuje náklady a zkracuje dobu výstavby modelů. Díky těmto novým technologiím lze významně zlepšit ekonomickou efektivnost fyzikálního modelování a zpřístupnit ho jako nejspolehlivější metodu analýzy chování vodních děl při povodních pro široké potřeby správců historických vodních děl a projektantů jejich rekonstrukcí.
- e) Zkušenosti z řady praktických aplikací naznačují, že kombinace numerického a fyzikálního modelování (tzv. hybridní modelování) může představovat užitečný přístup ve smyslu dalšího výrazného zefektivnění výzkumu vodních děl, které se projevuje zejména ve snížení počtu testovaných variant na hydraulickém modelu v laboratoři.



## IV. Popis uplatnění certifikované metodiky

Předložená metodika je určena pro správce vodních děl a projektanty vodních staveb, kteří se zabývají rekonstrukcí stávajících vodních děl s cílem zvyšování jejich bezpečnosti. Uvedené postupy lze obdobně využít i při přípravě nových konstrukcí. V příloze je zobrazena mapa a seznam významných vodních děl vedených v *Ústředním seznamu kulturních památek České republiky* (Národní památkový ústav) jako kulturní památka, příp. národní kulturní památka a vodních děl vybudovaných před II. světovou válkou. Tento poměrně rozsáhlý seznam svědčí o vysoké aktuálnosti problematiky.

V nedávné minulosti byly navrhovatelem metodiky uvedené metody fyzikálního hydraulického modelování s výhodami využity při návrzích úprav a posouzeních dále uvedených vodních děl:

### IV. 1 VD Harcov

#### Základní parametry:

Obec: Liberec

Rok uvedení do provozu: 1904

Hráz: zděná tížného typu, vysoká 19 m nad základem, v koruně široká 4,5 m a dlouhá 157 m

Celkový objem nádrže: 687 000 m<sup>3</sup>

Bezpečnostní přeliv: korunový, nehrazený, max. kapacita 16,3 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>

Stoletá voda: 30,1 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>

Hydrotechnický výzkum realizován v roce 2009-2010

Harcovská přehrada je vedena v *Ústředním seznamu kulturních památek České republiky* (Národní památkový ústav) pod číslem 43960/5-5244 jako kulturní památka od 3.5.1958. Vodní dílo Harcov patří do soustavy přehrad pro regulaci odtokových poměrů v povodí Lužické Nisy. Podnětem k výstavbě přehrady byly katastrofální povodně na konci 19. století, zejména povodeň z 30. 7. 1897, kdy byl zjištěn nevyšší průtok Harcovským potokem v Liberci 20 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Projekt vodního díla zpracoval a na stavbě měl současně hlavní dozor profesor Otto Intze z Cách. Komplexně byla přehrada dokončena v červnu 1904. V listopadu téhož roku zadržela přehrada povodeň o objemu 230 000 m<sup>3</sup>.

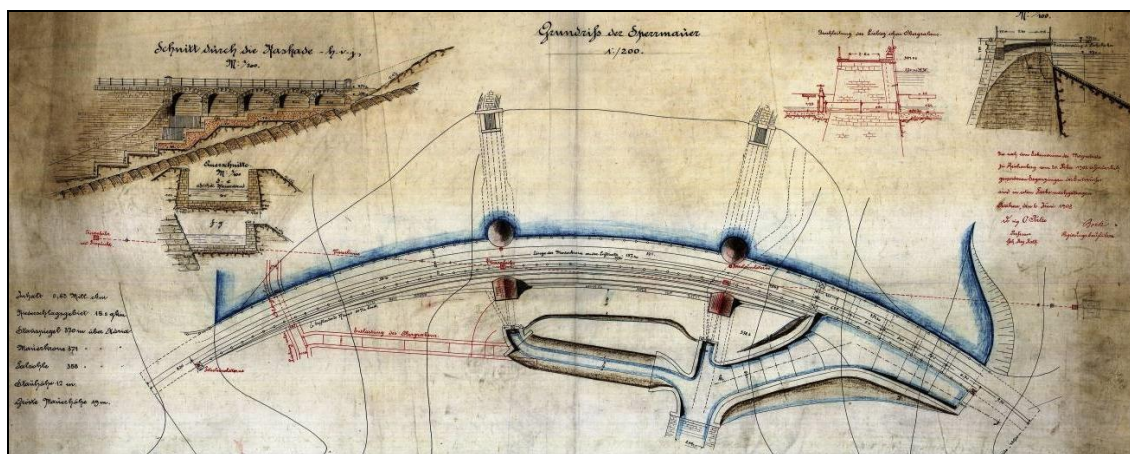
Pro vodní dílo Harcov byl v roce 2006 zpracován posudek bezpečnosti VD za povodní podle tehdy platné TNV 752935 „Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních“. Hydrologickým podkladem byly hydrogramy teoretických povodňových vln pro pravděpodobnost překročení kulminačního průtoku  $p_Q = 0,0001$ , stanovené v rámci studie ČHMÚ. V rámci studie byly odvozeny též dvě teoretické povodňové vlny PV 10 000, odvozené z 1 a 2 denní srážky. Při řešení úlohy transformace PV v nádrži bylo z výsledků patrné, že obě teoretické povodňové vlny nelze v ochranném prostoru nádrže ztransformovat a ve všech řešených případech dojde k přelití koruny hráze. Nepříznivým faktem jsou i dlouhodobě zvýšené vztlaky na základové spáře hráze při normálních

provozních hladinách v nádrži zaznamenané při výkonu TBD. Z výše uvedeného vzešel požadavek na stanovení kapacity stávajícího bezpečnostního přelivu VD Harcov spolu s posouzením navrhovaných úprav pomocí fyzikálního hydraulického modelu. Ve vodohospodářské laboratoři byl postaven model Harcovské přehrady v měřítku geometrické podobnosti 1:20. Práce na modelu se zaměřily zejména na posouzení následujících aspektů:

- Zvýšení kapacity stávajícího přelivu: změnou konstrukce přemostění přes jednotlivá pole přelivu; změnou tvaru přelivné plochy; snížením kóty přelivné hrany.
- Stanovení kapacity navazujícího kaskádového skluzu a posouzení jeho úprav.
- Posouzení úprav terénu v předpolí bezpečnostního přelivu.

Z provedeného hydrotechnického modelového výzkumu VD Harcov vyplynulo:

- Jelikož stávající stav bezpečnostních zařízení nevyhovuje z hlediska převádění extrémních povodňových průtoků, je nutno přistoupit k navrženým změnám na přelivu a ve skluzu.
- Úpravy na vodním díle jsou minimalizovány, aby nedošlo k výrazné změně historického vzhledu vodního díla. Úpravy jsou realizovány pod mostem a částečně na skluzu.
- Za předpokladu nejrozsáhlejších úprav (navýšení stěny skluzu, umístění usměrňovacího žebra ve skluzu, návrh nového přelivu s podtlakovou plochou a odstranění terénu v předpolí) bude při hladině 373,80 m n. m. (tj. 10 cm pod úroveň koruny hráze) kapacita přelivu  $82,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Spolu se spodními výpustmi kapacita odpovídá  $Q_{10000}$  (2denní srážka). Současná úroveň mezní bezpečné hladiny (MBH) je 378,40 m n. m. Aby bylo možno v budoucnu uvažovat s o 40 cm vyšší mezní bezpečnou hladinou je potřeba zvýšit stabilitu hráze (snížením vztlaků) a celkově zlepšit technický stav hráze.
- Ve skluzu byla testována úprava na čtvrtém stupni pomocí usměrňovacího žebra a byla vyhodnocena jako velice účelná.
- Maximální kapacita profilu odpovídající jednodenní srážce a průtoku  $Q_{10000} = 194 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  je při hladině v nádrži 374,35 m n. m., což je při přepadovém paprsku přes korunu přehrady 0,45 m.



Obr. 3 Původní výkresová dokumentace hráze.



**Obr. 4** Pohled na pět polí bezpečnostního přelivu s přemostěním ve skutečnosti a na hydraulickém modelu.

## IV.2 VD Hvězda

### Základní parametry:

Obec: Třebovice

Rok uvedení do provozu: 1378

Hráz: sypaná zemní, vysoká 10,6 m nad základem, v koruně široká 3,5 m a dlouhá 188 m

Celkový objem nádrže: 3,502 mil. m<sup>3</sup>

Bezpečnostní přeliv: nehrazený, délky 15 m, max. kapacita 84,85 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>

Stoletá voda: 62,0 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>

Hydrotechnický výzkum realizován v letech 2008 a 2010

Měřítko geometrické podobnosti modelu 1:14

Původní rybník Hvězda v povodí Třebovky ze 14. stol. po staletí významně přispíval ke zmírnění škodlivých účinků povodní níže po toku. Při extrémní letní povodni v r. 1997 na vodním díle bylo nutno řešit krizovou povodňovou situaci. Z iniciativy správce povodí státního podniku Povodí Labe, byly po r. 1997 zpracovány vodohospodářské studie povodňových stavů, které zahrnuly i dílčí povodí Třebovky. S ohledem na prokázaný významný účinek nově uvažovaných technických opatření se neprodleně přikročilo ke zpracování projektové dokumentace a k vlastní výstavbě.

Významnou součástí řešení byla realizace čtyř tzv. suchých nádrží v horním povodí Třebovky a zejména zvětšení retenční schopnosti nádrže VD Hvězda – díky zvýšení hráze a vybudování nového sdruženého objektu, zahrnujícího bezpečnostní přeliv, spodní výpusti a MVE. Výstavba proběhla v letech 2004-2005. V rámci projektu se hydraulická funkce sdruženého objektu posuzovala pomocí klasických hydraulických výpočtů, i když s ohledem na vzájemné ovlivnění jednotlivých hydraulických jevů bylo zřejmé, že realita může být odlišná. S ohledem na nedostatek času v rámci daných lhůt příprav rekonstrukce i předpoklad, že max. kapacity zařízení bylo možno stanovit výpočtem vcelku spolehlivě, se tehdy nepovažovalo za nezbytné provést hydraulický (fyzikální) modelový výzkum.



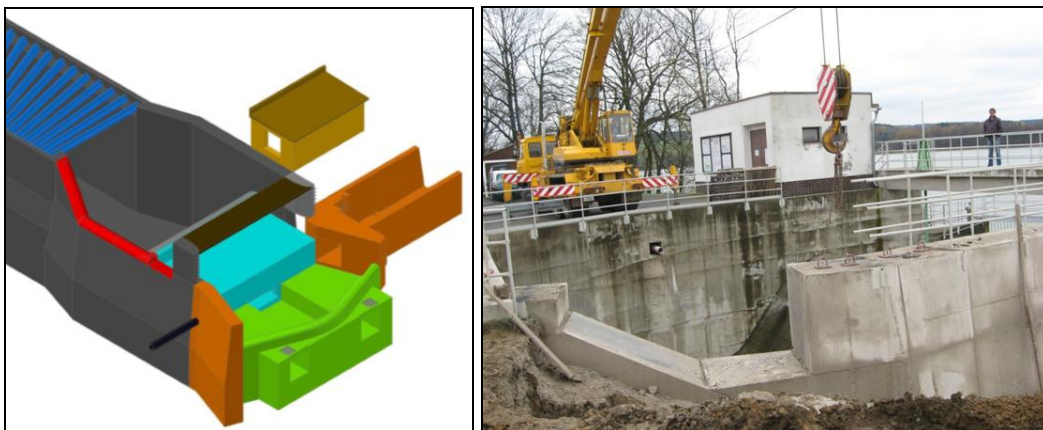
V období po uvedení nově vybudovaných protipovodňových opatření do provozu (od r. 2006) se v souvislosti s výskytem dalších povodňových průtoků ukázala potřeba revize posouzení bezpečnosti hráze za extrémních povodní podle aktuálně platných předpisů. Posudek bezpečnosti VD Hvězda za extrémních povodní s dobou opakování 10 000 let byl zpracován v říjnu 2009 firmou VODNÍ DÍLA – TBD a.s. Výsledek posudku poukázal na nedostatečnou kapacitu zařízení pro převádění vody při výskytu takto extrémních povodní.

Proto správce objektu (Povodí Labe, s. p.) zadalo vypracovat hydraulický modelový výzkum (Fakulta stavební ČVUT v Praze) zaměřený na variantní úpravy sdruženého objektu, které by zajistily bezpečné převedení kontrolní povodně s dobou opakování 10 000 let. Výstupem ověření hydraulické funkce sdruženého objektu je návrh technických úprav stávajícího objektu. V rámci příprav výzkumu bylo nutné provést zpřesnění vstupních podkladů - opakovaný průzkum skutečného provedení betonových částí konstrukce důležitých z hydraulického hlediska.

Cílem výzkumu bylo prověřit kapacitu sdruženého objektu při úrovni hladiny na kótě koruny hráze a prověřit možnosti zvýšení kapacity přelivu návrhem prodloužení stávající přelivné hrany na kótě 422,30 m n. m. Dalším cílem výzkumu bylo experimentální ověření chování proudu odtékající vody s ohledem na zajištění bezpečnosti vodního díla v oblasti vzdušní paty hráze.

Na základě výsledků měření byly provedeny variantně zcela nové návrhy přelivu – prodloužením přelivné hrany ubouráním částí levé stěny sdruženého objektu. Ze série provedených měření vzešlo doporučení k realizaci varianty, při které byla navržena dílčí úprava prodlouženého přelivu s celkovou délkou 10 m. Část přelivné hrany u pozemní komunikace je vedena pod úhlem 45° od vodorovné (délka 3 m) na konci vodorovné přelivné hrany dlouhé 7 m. Navíc jsou v této variantě maximálně zlepšeny nátokové podmínky v oblasti předpolí nouzového přelivu a nového prodlouženého přelivu ubouráním stávající svislé stěny až k místu levého pilíře komunikační lávky. Vyhodnocení měření konsumpční křivky výsledného návrhu:  $Q_{10\,000} = 119,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (nejnepříznivější varianta PV 10 000) hladina v nádrži je dle měření na kótě 424,17 m n. m., podle „Posudku bezpečnosti za povodně“ (VODNÍ DÍLA - TBD a.s., říjen 2009) je mezní bezpečná hladina vody v nádrži 424,06 m n. m. (nejnižší úroveň koruny hráze snižená o výběh větrových vln). V další fázi je zapotřebí řešit zvýšení MBH (například přidáním vlnolamu či navýšením kóty koruny hráze).

Technické řešení rekonstrukce přelivu realizovaného v roce 2012 spočívalo v odřezání části železobetonové stěny stávajícího sdruženého objektu s následnou demontáží odřezaných bloků. Nově vzniklý přeliv je z nerezového plechu ve tvaru zaoblené přelivné hrany a podbetonován samozhutnitelným betonem.



**Obr. 5** 3D vizualizace navrženého uspořádání sdruženého objektu s prodloužením nouzového přelivu (červeně) a fotodokumentace z realizace navržených úprav v roce 2012 [<http://www.aquasys-vhs.cz/cs/vodni-dilo-hvezda/1>]

### IV.3 VD Les Království

#### Základní parametry:

Obec: Bílá Třemešná

Rok uvedení do provozu: 1919

Hráz: zděná, vysoká 41,0 m nad základem, v koruně široká 7,2 m a dlouhá 218 m

Celkový objem nádrže: 9,159 mil. m<sup>3</sup>

Bezpečnostní přelivy: korunový a šachtový, nehrazené, max. kapacita 255,94 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>

Stoletá voda: 355,0 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>

Hydrotechnický výzkum realizován v roce 2013

Vodní dílo Les Království je v *Ústředním seznamu kulturních památek České republiky* (Národní památkový ústav) pod číslem 24486/6-3435 vedeno jako kulturní památka již od 3.5.1958. Nařízením vlády č. 50/2010 Sb. ze dne 8.2.2010 byla přehrada a vodní elektrárna Těšnov v Bílé Třemešné prohlášena za národní kulturní památku.

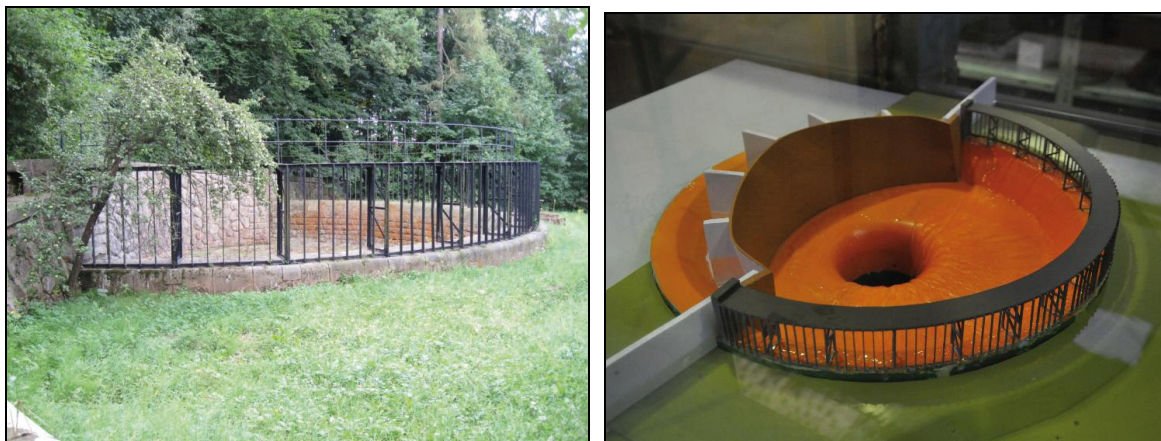


**Obr. 6** Pohled na hráz VD Les Království – národní kulturní památka.

V rámci výzkumu šachtového přelivu na vodním díle Les Království byl postaven model v měřítku 1:36,04. Cílem bylo analyzovat chování proudění vody 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 byly použity konsumpční křivky. Ty relativně potvrdily 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 nátoku do šachtového přelivu, umístění česlí, usměrňovací prvky). Jde především o vliv usměrňovacích prvků na začátku šachty. Modelem bylo zjištěno, že levotočivé zakřivení těchto prvků mělo proti 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 kolenu 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 byla získána podrobná data o průběhu tlaku v odpadní šachtě. Byla lokalizována nejzatíženější místa, především konec odpadní šachty před 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. Místy byly naměřeny hodnoty až třikrát větší než v případě bez jejich použití. Tento vyšší tlak přispívá k celkové tlakové stabilitě, je menší možnost vzniku tlakových pulsací a vzniku nežádoucích podtlaků.



**Obr. 7** Šachtový přeli na VD Les Království ve skutečnosti a v měřítku 1:36,04 v laboratoři.



## **IV.4 VD Labská**

### **Základní parametry:**

Obec: Špindlerův Mlýn

Rok uvedení do provozu: 1916

Hráz: zděná, vysoká 41,5 m nad základem, v koruně široká 6,15 m a dlouhá 153,5 m

Celkový objem nádrže: 3,292 mil. m<sup>3</sup>

Bezpečnostní přelivy: korunový a šachtový, nehrazený, max. kapacita 153,49 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>

Stoletá voda: 175,0 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>

Hydrotechnický výzkum realizován v roce 2014

V hydrotechnické laboratoři byl vybudován fyzikální model pravého šachtového přelivu VD Labská v měřítku geometrické podobnosti 1:34. Cílem bylo analyzovat prodění vody a kapacitu přelivu při různých technických úpravách na přelivu. Následně pak porovnat tyto hodnoty s výsledky získaných analytickou metodou, vyhodnotit a podrobně popsat tlakové poměry v odpadní šachtě. Na modelu bylo celkem vyhodnoceno 6 typů technických možností úprav šachtového přelivu (např. přidání různých typů usměrňovacích prvků). Výsledky výzkumu jsou porovnání teoretické a naměřené konsumpční křivky a srovnání průběhy tlaků v celé délce odpadního vedení při všech úpravách šachtového přelivu.





## V. Ekonomické aspekty

Ekonomické aspekty zavedení navrženého metodického postupu lze odhadovat následovně:

### Náklady na zavedení postupu

Zavedení metodického postupu spočívá ve výběru odborného subjektu, který bude pomocí uvedených zásad realizovat v rámci předprojektové přípravy hydraulický modelový výzkum. Cílem výzkumu bude zvyšování bezpečnosti vodních děl při povodních a oslovené subjekty musí být vybaveny vodohospodářskou laboratoří s odpovídající měřicí technikou a hydraulickým okruhem. Takových pracovišť je v ČR několik.

Výběr tohoto zpracovatele proběhne zpravidla formou veřejné soutěže. Na základě zkušeností lze ve většině obdobných případů očekávat náklady v řádu stovek tisíc Kč.

### Přínosy zavedeného postupu pro uživatele

Vodní díla se řadí mezi hydrotechnické stavby, které se vyznačují zejména svým velkým rozsahem, finanční náročností a individuálním charakterem. Vzhledem k těmto skutečnostem je vhodné věnovat jejich rekonstrukcím popř. realizaci patřičnou pozornost již v počátečních fázích projektové přípravy, kdy je třeba hledat řešení, které zajistí naplnění projektovaných účelů a současně minimalizuje možné provozní problémy a dodatečné náklady. Zkušenosti dokazují, že podcenění předprojektové přípravy může vést k nevhodnému návrhu konstrukcí vodních děl, kdy projektované parametry nejsou naplněny a dodatečná úprava je zpravidla finančně velmi nákladná a řádově převyšuje finanční náročnost hydraulického výzkumu. Individuální charakter vodních staveb je dán skutečností, že v podstatě neexistují dvě stejná vodní díla se stejnými hydrologickými, technickými, morfologickými a dalšími podmínkami. Souhrn poznatků o funkci vodních děl v jedné lokalitě je proto obtížně přenositelný pro návrh dalších vodních děl stejného typu.

Uživatelé metodiky budou zejména správci vodních děl, kteří plánují zvýšení jejich bezpečnosti v souladu s aktuálními legislativními požadavky závaznými dle vyhlášky 590/2002 Sb., případně projektanti těchto úprav. Finanční přínos pro uživatele postupů hydraulického výzkumu spočívá zejména v zajištění nejspolehlivějšího možného podkladu pro realizaci úprav funkčních objektů a úspoře dalších výdajů vyplývajících z dodatečných úprav při podcenění předprojektové přípravy.



## VI. Seznam použité související literatury

1. Broža, V.: Přehradý Čech, Moravy a Slezska. Vyd. 2. Liberec: Knihy 555, 2009, 251 s. ISBN 978-80-86660-11-7.
2. Čábelka, J., Gabriel, P.: Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice (1), Výzkum na hydraulických a ve skutečnosti. Academia Praha 1987.
3. Havlík, V., Marešová, I.: Hydraulika: Příklady. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1990.
4. Hunter, S.C.: Mechanics of Continuous Media, Ellis Horwood, Chichester, England 1976.
5. Kolář, V., Patočka, C., Bém, J.: Hydraulika, SNTL, Praha 1983.
6. Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A., Reeve, D.E.: Hydraulic Modelling - An Introduction, Taylor and Francis, 2010.
7. Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C., Narayanan, R.: Hydraulic structures, Fourth edition, Taylor and Francis, 2007.

### Legislativní podklady a normy:

1. Zákon o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon) č. 254/2001 Sb.
2. Zákon České národní rady o státní památkové péči č. 20/1987.
3. Vyhláška Ministerstva zemědělství o technickobezpečnostním dohledu nad vodními díly č. 471/2001 Sb.
4. Vyhláška o technických požadavcích pro vodní díla č. 590/2002 Sb.
5. ČSN 75 2340 Navrhování přehrad - Hlavní parametry a vybavení. Říjen 2004.
6. ČSN 75 2935 Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních. Leden 2014.



## VII. Seznam publikací, které předcházely metodice

Dedikované publikace projektu NAKI č. DF11P01OVV009 jsou v seznamu níže podtržené.

### CLA – Článek

#### **Odborný recenzovaný časopis**

##### **Článek v periodiku z pozitivního seznamu RVVI česky (Jrec)**

BROŽA, Vojtěch a Martin KRÁLÍK. Les Království - modelový výzkum. *Stavební obzor*. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2014, **23**(5-6): 171-175. ISSN 1210-4027.

KRÁLÍK, Martin. Bezpečnostní přelivy zděných přehrad. *Stavební obzor*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2012, **21**(4): 108-113. ISSN 1210-4027.

KRÁLÍK, Martin a Milan ZUKAL. Hydraulické modely bezpečnostních objektů VD Koryčany a VD Harcov. *Vodní hospodářství*. Praha, 2012, **62**(7): 242-245. ISSN 1211-0760.

KRÁLÍK, Martin a Milan ZUKAL. Hydraulický model sdruženého objektu VD Hvězda. *Vodní hospodářství*. Praha, 2010, **60**(4): 88-90. ISSN 1211-0760.

##### **Článek v periodiku excerpovaném databází Scopus (Jsc)**

ZUKAL, Milan, Martin KRÁLÍK a Ladislav SATRAPA. Hydraulic modelling for dams in the Czech Republic. *The International Journal on Hydropower & Dams*. Wallington: Aqua-Media International Ltd., 2011, **18**(10): 77-82. ISSN 1352-2523.

### STA - Stať ve sborníku

#### **Stať ve sborníku z mezinárodní konference**

ZUKAL, Milan a Martin KRÁLÍK. Hydraulic model of Harcov historical dam. In: *CESB 13 Prague. Central Europe towards Sustainable Building 2013*. Praha: GRADA PUBLISHING, 2013, s. 935-938. ISBN 978-80-247-5018-7.

ZUKAL, Milan, Martin KRÁLÍK a Ladislav SATRAPA. Hydraulic research of dams. In: *Hydro 2011: Practical Solutions for a Sustainable Future*. Wallington: Aqua-Media International Ltd., 2011, s. 9.

#### **Stať ve sborníku z lokální konference česky**

KRÁLÍK, Martin, Tomáš KAŠPAR a Michael MILDNER. VD Labská - modelový výzkum šachtového bezpečnostního přelivu. In: *Voda a krajina 2015*. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného hospodářství, 2015, s. 35-46. ISBN 978-80-01-05794-0.

KRÁLÍK, Martin. Les Království - modelový výzkum šachtového bezpečnostního přelivu. In: *Recenzovaný sborník příspěvků interdisciplinární vědecké konference doktorandů*



a odborných asistentů *QUAERE 2014*. Hrad. Králové: Magnanimitas, 2014, s. 1472-1481. ISBN 978-80-87952-04-7.

KRÁLÍK, Martin, Vladimír BURIAN a Eliška ADÁMKOVÁ. Les Království - modelový výzkum šachtového bezpečnostního přelivu. In: *Voda a krajina 2014*. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra hydromeliorací a krajinného hospodářství, 2014, s. 71-81. ISBN 978-80-01-05533-5.

KRÁLÍK, Martin a Milan ZUKAL. Hydraulický model vodního díla Harcov. In: *QUAERE 2013*. Hradec Králové: Magnanimitas, 2013, s. 2856-2862. ISBN 978-80-905243-7-8.

### **FVZ – Funkční vzorek (anotace, autoři a roky převzaty z VVVS)**

#### Model šachtového bezpečnostního přelivu historické kamenné přehrady (Králík, 2013)

Pravý šachtový přeliv je umístěn na pravé m údolním svahu nádrže cca 150m nad hrází. Celý přelivný objekt pro převádění velkých vod tvoří půlkruhová přelivná plocha, plynule navazující na svislou kruhovou šachtu, která kruhovým obloukem plynule předchází do odpadní štolu, která dále navazuje na pravou obtokovou štolu. Vlastní vtok do šachty je chráněn ocelovým brlením opřeným o ocelovou lávku. Při povodňových průtocích se plní nejprve zásobní prostor nádrže, dále pak retenční prostor nádrže. Při projektování vodního díla bylo uvažováno se stoletým povodňovým průtokem. V průběhu téměř století od uvedení do provozu se změnila legislativa pro posuzování bezpečnosti přehrad na kontrolní povodeň, kterou musí vodní dílo bez vážnějšího poškození převést, a to průtok 10 000 leté vody. Z tohoto důvodu je vhodné znát hydraulickou funkci šachtového přelivu, svislé a vodorovné štolu při zvýšené hladině vody v nádrži.

#### Hydraulický model vodního díla Labská (Králík, 2014)

Výzkum na tomto modelu se zabývá hydraulickým výzkumem šachtového přelivu na vodním díle Labská. V hydrotechnické laboratoři byl vybudován fyzikální model pravého šachtového přelivu VD Labská 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 konsumpční křivky a srovnány průběhy tlaků v celé délce odpadního vedení při všech úpravách šachtového přelivu.

#### Model bezpečnostního přelivu historické kamenné přehrady (Králík, 2012)

Současná kapacita bezpečnostního přelivu (o pěti polích) a obou spodních výpustí je nedostatečná. Zvýšení kapacity vodního díla je teoreticky možné realizovat různými technickými opatřeními: zvýšením kapacity stávajícího bezpečnostního přelivu (např. snížením přelivných hran přelivných polí), vybudováním nové spodní výpusti, přidáním dalšího bezpečnostního přelivu (např. bočního typu na pravém břehu) a další možnosti. Je však bezpodmínečně nutné k výběru řešení přistupovat velice zodpovědně, aby nedošlo k narušení historického rázu této významné kulturní památky. Pokud budou úpravy po stavební stránce provedeny citlivě (se



zachováním charakteru původního zdiva) pak by tento zásah neměl mít nepříznivý vliv na celkový historický ráz vodního díla ani na jeho okolí a životní prostředí. Úprava bezpečnostního přelivu vychází z poznatků a měření na modelu stávajícího bezpečnostního přelivu s ohledem na zachování stávajícího historického rázu přeprady a zachování dobré hydraulické funkce přelivu. Byl navržen a úspěšně otestován nový přeliv s podtlakovou přelivnou plochou, kdy byla snížena přelivná hrana o 0,4 m.

#### Hydraulický model VD Hvězda (Králík, 2011)

V souvislosti s výskytem dalších povodňových epizod se ukázala potřeba hlubšího poznání vztahů mezi hladinou vody v nádrži a okamžitou kapacitou pojistných zařízení v zájmu optimálního řízení povodňového odtoku. Hydraulický modelový výzkum byl proveden s cílem podstatně zvýšit úroveň poznání hydraulické funkce nového sdruženého objektu až do povodně Q10 000. Cílem výzkumu bylo prověřit kapacitu sdruženého objektu při úrovni hladiny na kótě koruny hráze a prověřit možnosti zvýšení kapacity přelivu prodloužením přelivné hrany s ohledem na zajištění bezpečnosti hráze.

#### Hydraulický model VD Harcov (Králík, 2010)

Pro vodní dílo Harcov, jehož vzdouvací konstrukcí je historická zděná hráz z lomového kamene, byl v roce 2006 zpracován posudek bezpečnosti VD za povodní. Hydrologickým podkladem byly hydrogramy teoretických povodňových vln pro pravděpodobnost překročení kulminačního průtoku  $pQ = 0,0001$ . Při řešení úlohy transformace PV v nádrži bylo z výsledků patrné, že teoretické povodňové vlny nelze v ochranném prostoru nádrže ztransformovat a ve všech řešených případech dojde k přelití koruny hráze. Zvýšení kapacity je možné snížením přelivné hrany bezpečnostního přelivu, vhodné je i odstupňované snížení, rozdílné pro jednotlivá pole.

### VZP - Výzkumná zpráva

SATRAPA, Ladislav, Martin KRÁLÍK, Milan ZUKAL a Jitka KUČEROVÁ. *Hydrotechnický výzkum VD Harcov - prezentační model přelivu*. Praha, 2012. Výzkumná zpráva v češtině.

SATRAPA, Ladislav. *Hydrotechnický výzkum VD Harcov: Modelový výzkum pro ověření kapacity bezpečnostního přelivu, skluzu a popis proudění vody v nádrži, ve skluzu, ve vývaru, odpadním korytě a ve vývaru od spodních výpustí*. Praha, 2010. Zpráva o provedeném výzkumu. ČVUT v Praze.

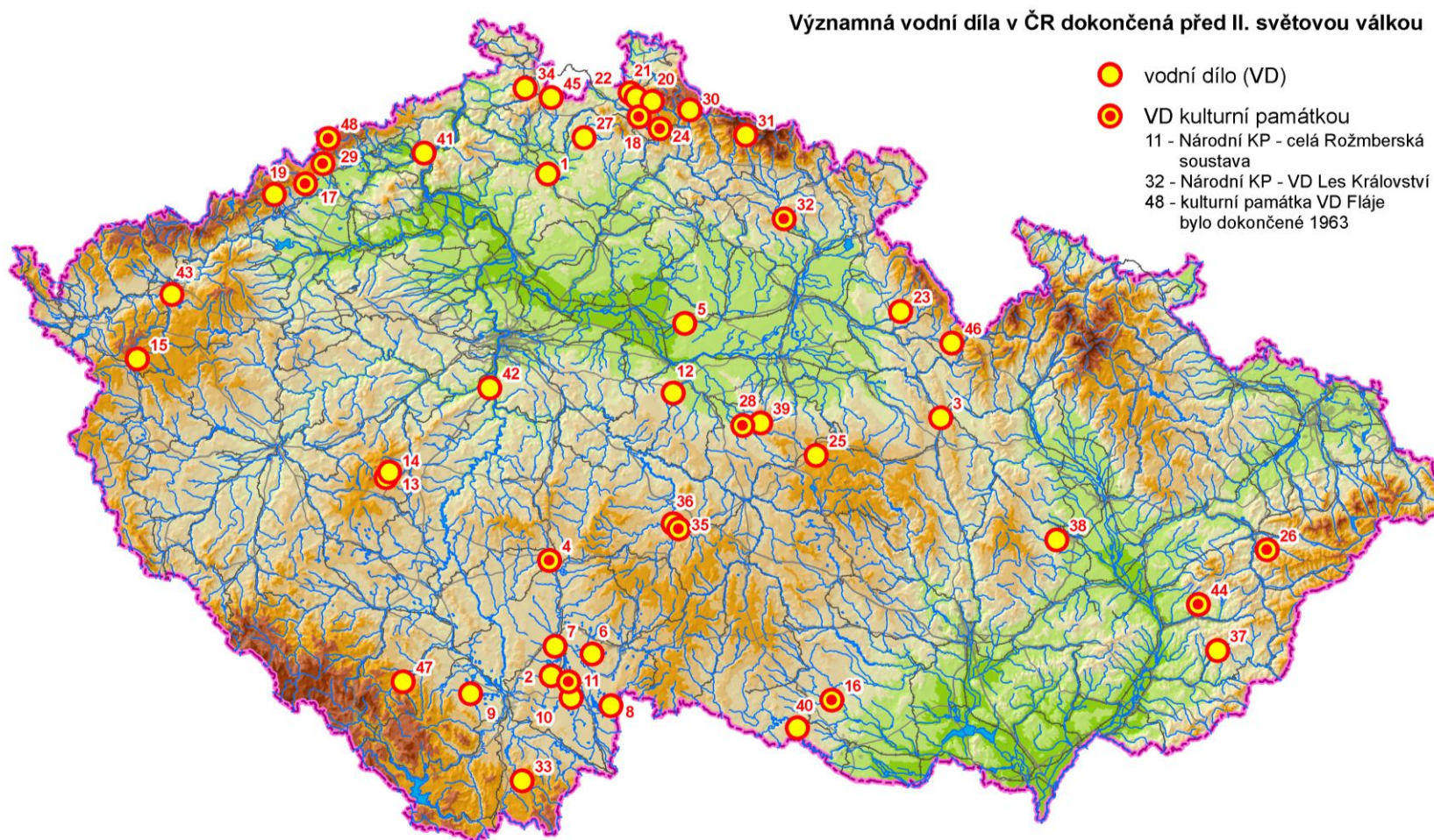
SATRAPA, Ladislav. *Fyzikální hydraulický model VD Hvězda – doplňkový výzkum: Modelový výzkum pro ověření kapacity bezpečnostního přelivu*. Praha, 2010. Zpráva o provedeném výzkumu. ČVUT v Praze.

KRÁLÍK, Martin. *Fyzikální hydraulický model VD Hvězda: Modelový výzkum pro ověření kapacity bezpečnostního přelivu*. Praha, 2008. Zpráva o provedeném výzkumu. ČVUT v Praze.



## Příloha

Mapa významných vodních děl vedených v *Ústředním seznamu kulturních památek České republiky* (Národní památkový ústav) jako kulturní památka, příp. národní kulturní památka a vodních děl vybudovaných před II. světovou válkou.





Č.	Jméno díla	Rok	Tok	Typ	Účel VD	Výška hráze [m]	Délka hráze [m]	Objem nádrže [mil. m <sup>3</sup> ]	Pozn.
1	Máchovo jezero	1272	Robečský p.	SZ	CH,R,O	10,0	209,0	6,39	
2	Dvořiště	1363	Miletínský p.	SZ	CH,R	10,0	570,0	6,70	
3	Hvězda	1378	Třebovka	SZ	CH,O,R	10,6	188,0	3,50	
4	Jordán	1492	Tisмениcký p.	SZ	V,O,CH	20,0	284,0	3,00	KP
5	Žehuňský rybník	1497	Cidlina	SZ	CH				
6	Velké Holná	1500	Holenský p.	SZ	CH	12,0	282,0	5,54	
7	Horusický rybník	1512	Bukovský p.	SZ	CH	11,0	730,0	3,97	
8	Staňkovský rybník	1550	Koštěnický p.	SZ	CH,R,O	16,0	170,0	6,33	
9	Dehtář	1479	Dehtářský p.	SK	CH	10,0	234,0		
10	Svět	1573	Spolský p.	SZ	CH,R	7,0	1400,0	3,33	
11	Rožmberk	1590	Lužnice	SZ	CH,O	12,0	2340,0	6,30	NKP*
12	Velký rybník	1850	Vrchlice	SZ	R	16,0	88,0	0,25	
13	Láz	1850	Litávka	SZ	V,N	15,7	245,0	0,83	
14	Piřská (u Příbrami)	1853	Piřský p.	SZ	V,N	19,0	380,0	1,59	
15	Mariánské Lázně	1896	Kamenný p.	ZD	V	19,9	116,0	0,28	
16	Jevišovice	1897	Jevišovka	ZD	O,R	25,0	122,0	0,55	KP
17	Jezeří	1903	Vesnický p.	ZD		23,1	86,0	0,05	KP
18	Harcov	1904	Harcovský p.	ZD	O,R	19,0	157,0	0,69	KP
19	Kamenička	1904	Kamenička	ZD	V	44,5	153,0	0,71	
20	Bedřichov	1905	Černá Nisa	ZD	O,E	23,5	340,0	2,10	
21	Fojtka	1906	p. Fojtka	ZD	O,R	16,0	146,2	0,32	
22	Mlýnice	1906	Albrechtický p.	ZD	O	22,0	159,0	0,27	
23	Ivanské jezero	1910	Javornický p.	ZD	CH	7,0	82,0		
24	Mšeno	1911	Mšenský p.	ZD	O,R	20,0	425,5	2,79	KP
25	Hamry	1912	Chrudimka	SZ	V,O	17,7	208,4	3,62	
26	Bystřička	1912	Bystřička	ZD	O,R,E	36,0	170,0	4,96	KP
27	Stráž pod Ralskem	1913	Ploučnice	SZ	O,R	7,3	950,0	1,78	
28	Pařížov	1913	Doubrava	ZD	O,E	31,0	142,0	1,76	KP
29	Janov	1914	Loupnice	ZD	O	53,1	225,0	1,67	KP
30	Souš	1915	Černá Desná	SZ	V,O	25,0	364,0	7,56	
31	Labská	1916	Labe	ZD	O,E	41,5	153,5	3,29	
32	Les Království	1919	Labe	ZD	O,E	41,0	218,0	9,16	NKP
33	Soběnov	1925	Černá	ZD	E	8,6	90,0	0,17	
34	Chřibská	1926	Chřibská Kamenice	SZ	V,O	26,1	190,0	1,21	
35	Sedlice	1927	Želivka	ZD	E,N,ZS,R	27,0	118,0	1,87	KP
36	Vřesník	1928	Želivka	ZD	VQ,E	9,5	78,7	0,37	
37	Luhačovice	1930	Luhačovický p.	SZ	O,R,E	19,0	240,0	2,70	
38	Plumlov	1932	Hloučela	SZ	O,R,E	18,0	469,5	5,57	
39	Seč	1934	Chrudimka	ZD	O,E,V,R	42,0	165,0	22,10	
40	Vranov	1934	Dyje	BT	V,ZS,E,O,R	59,0	290,5	132,70	
41	Střekov	1936	Labe	BT	P,E	23,2	234,0	15,85	
42	Vrané	1936	Vltava	JT	VQ,E,R,P	22,0	96,8	11,10	
43	Březová	1937	Teplá	BT	O,E,R	38,6	229,0	5,69	
44	Fryšták	1938	Fryštácký p.	SZ	O	15,0	198,0	2,95	KP
45	Naděje	1938	Hamerský p.	ZD		9,5	91,6	0,03	
46	Pastviny	1938	Divoká Orlice	BT	O,E,R	38,5	192,7	10,82	
47	Husinec	1939	Blanice	ZD	V,N,E,O	34,1	197,0	5,64	
48	Fláje	1963	Flájský p.	BT	V,E,O,Z	55,5	459,0	23,10	KP

**Typ:**

SZ - sypaná zemní  
SK - sypaná kamenitá  
ZD - zděná  
BT - betonová

**Účel:**

E - využití energie  
O - ochrana před povodněř  
R - rekreace  
N - minimální zůstatkový pr  
V - vodárenský  
Z - zásobní

CH - chov ryb  
VQ - vyrovnání rozkolísaného průtoku  
ZS - zachycování splavenin

KP - kulturní památka  
NKP - národní kulturní památka  
\* - NKP celá Rožmberská soustava