



VD Letovice – studie návrhu opatření k bezpečnému převedení KPV₁₀₀₀₀

Studie

**B POSOUZENÍ VÝCHOZÍHO STAVU A NÁVRH
KONCEPCÍ ŘEŠENÍ**

B.1 Hydrotechnické výpočty

Objednatel: Povodí Moravy, státní podnik

VD Letovice – studie návrhu opatření k bezpečnému převedení KPV₁₀₀₀₀

B.1 HYDROTECHNICKÉ VÝPOČTY

Obsah

1	ÚVOD	2
1.1	Podklady	2
1.2	Seznam použitých zkratk	2
2	HYDROLOGICKÉ ÚDAJE	3
3	VÝPOČETNÍ PROSTŘEDKY	5
4	POSOUZENÍ SOUČASNÉHO STAVU	6
4.1	Čára objemů nádrže	6
4.2	Měrná křivka koryta pod hrází	6
4.3	Spodní výpusti	7
4.4	Bezpečnostní přeliv	9
4.5	Přepad přes korunu vlnolamu	12
4.6	Transformace povodňových vln	13
5	NÁVRH PARAMETRŮ NOVÉHO BEZPEČNOSTNÍHO OBJEKTU	17
5.1	Bezpečnostní přeliv a spadiště	17
5.2	Skluz od bezpečnostního přelivu	23
5.3	Vývar pod skluzem od bezpečnostního přelivu	25
6	POSOUZENÍ BEZPEČNOSTI VD V PRŮBĚHU REKONSTRUKCE	27

1 ÚVOD

Účelem hydrotechnických a vodohospodářských výpočtů, provedených v rámci překládané studie bylo:

- ověření měrných křivek stávajících funkčních objektů VD Letovice;
- ověření transformací vybraných PV (zejména KPV_{10 000}) v současném stavu;
- návrh a optimalizace základních parametrů nového bezpečnostního zařízení;
- ověření transformací vybraných PV (zejména KPV_{10 000}) v návrhovém stavu;
- základní posouzení bezpečnosti VD v průběhu realizace.

1.1 Podklady

Číslování podkladů odpovídá seznamu použitých podkladů doloženému v části A Průvodní zpráva této dokumentace.

1.2 Seznam použitých zkratk

B. p. v.	Výškový systém Balt po vyrovnání
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČSN	Česká technická norma
DN	Jmenovitý průměr
DOP	Dolní okrajová podmínka
EZ	Etapová zpráva o TBD
H _{MAX}	Maximální hladina
HOP	Horní okrajová podmínka
H _{RN}	Hladina neovladatelného retenčního prostoru
H _{RO}	Hladina ovladatelného retenčního prostoru
H _{SN}	Hladina stálého nadržení
H _Z	Hladina zásobního prostoru
KPV	Kontrolní povodňová vlna
LB	Levý břeh
LMG	Limnigrafická stanice
MBH	Mezní bezpečná hladina
MOD modelem	Přípona označující hydrogram PV odvozený srážkoodtokovým modelem
MŘ	Manipulační řád
MVE	Malá vodní elektrárna
PB	Pravý břeh
POV	Plán organizace výstavby
PV _N	N – letá povodňová vlna, povodňová vlna s pravděpodobností dosažení nebo překročení kulminačního průtoku jednou za N let.
Q	Průtok
Q _{KULM}	Kulminační průtok

Q_N	N – letý průtok, průtok s pravděpodobností dosažení nebo překročení jednou za N let.
$Q_{NEŠ}$	Neškodný průtok pod VD
TBD	Technicko bezpečnostní dohled
TEOR	Přípona označující hydrogram PV odvozený klasickým statistickým způsobem
TNV	Odvětvová technická norma vodního hospodářství
VD	Vodní dílo
V_Z	Zásobní prostor
V_{RN}	Retenční neovladatelný prostor
V_{RO}	Retenční ovladatelný prostor

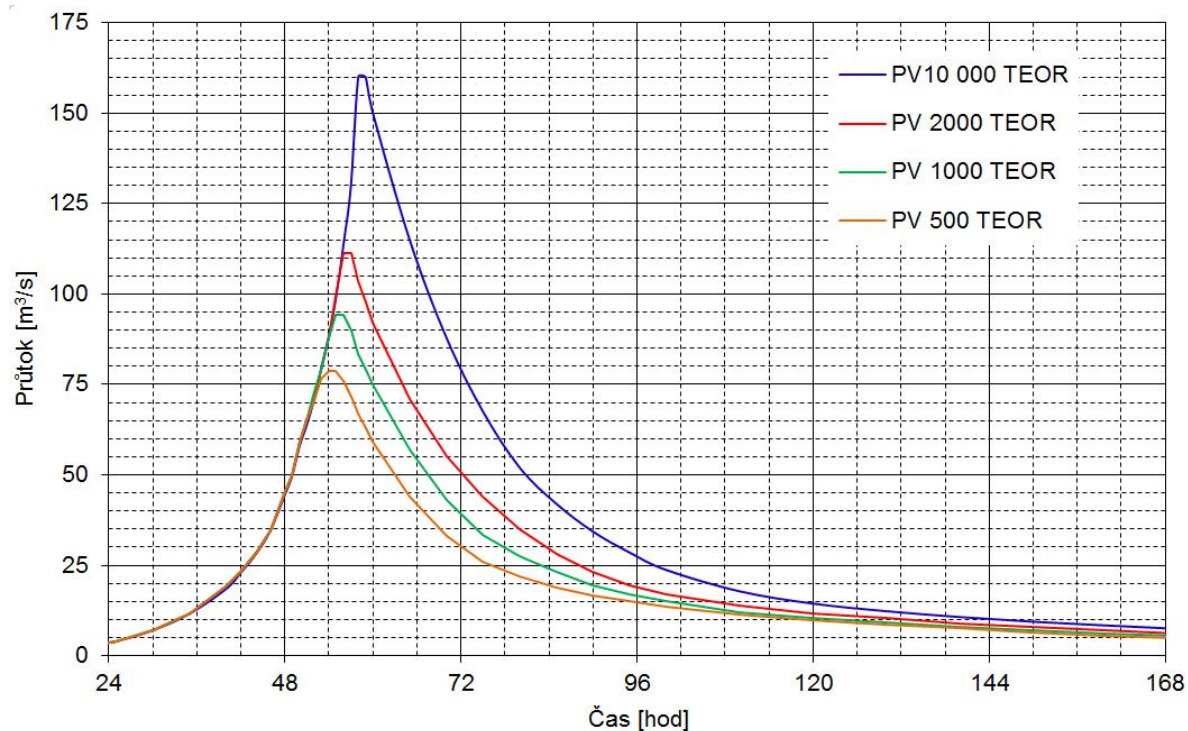
2 HYDROLOGICKÉ ÚDAJE

Hydrologické údaje byly poskytnuty ČHMÚ v rámci studie [5], platnost údajů byla ověřena podkladem [6]. V následujícím přehledu jsou uvedeny základní údaje pro profil hráze VD Letovice. V uvedené hydrologické studii byly hydrogramy PV₁₀₀ až PV_{10 000} odvozeny pomocí srážkoodtokového modelu (v předkládané studii značeno MOD, např. PV_{1000 MOD}) a tzv. klasickým přístupem (v předkládané studii značeno TEOR, např. PV_{1000 TEOR}).

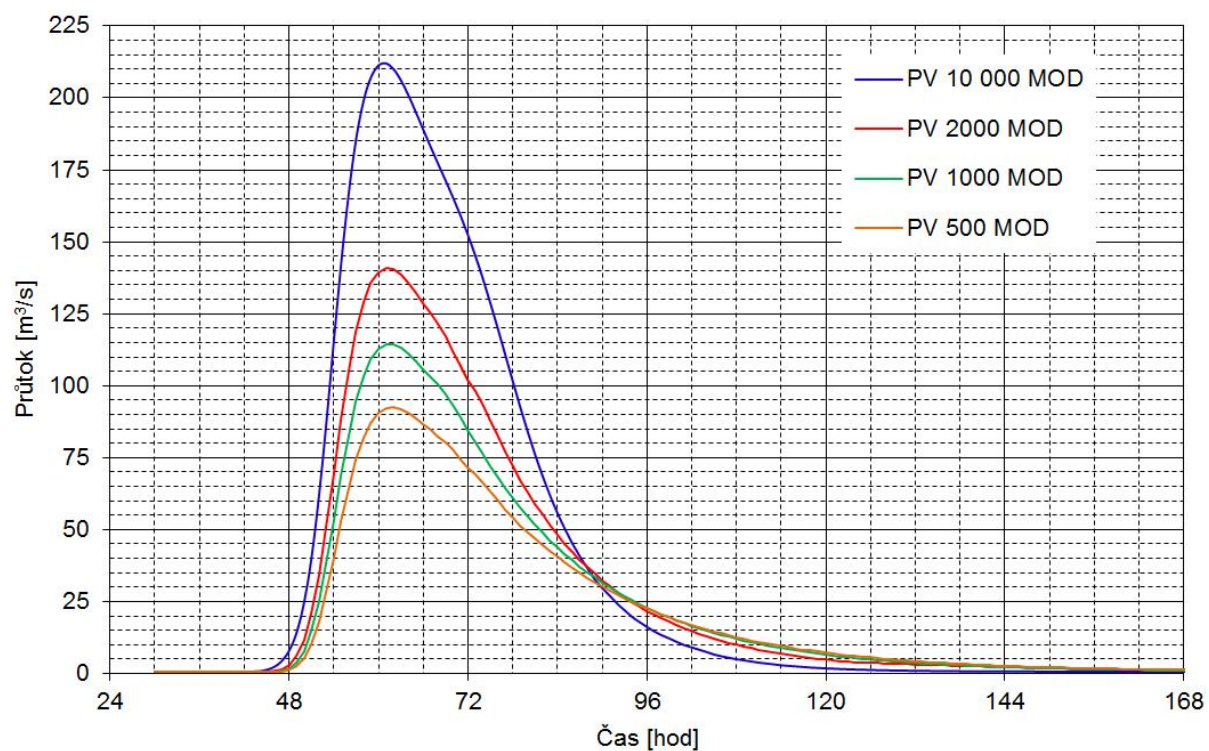
Vodní tok	Křetínka
Číslo hydrologického pořadí	4-15-02-034
Profil	hráz VD Letovice
Plocha povodí A	126,5 km ²
Průměrný roční srážkový úhrn	686 mm/rok
Průměrný roční průtok	0,644 m ³ /s

Tab. 01. Kulminační průtoky a objemy vybraných PV dle hydrologické studie [5], objemy PV jsou pro danou N - letost identické pro oba způsoby odvození hydrogramu.

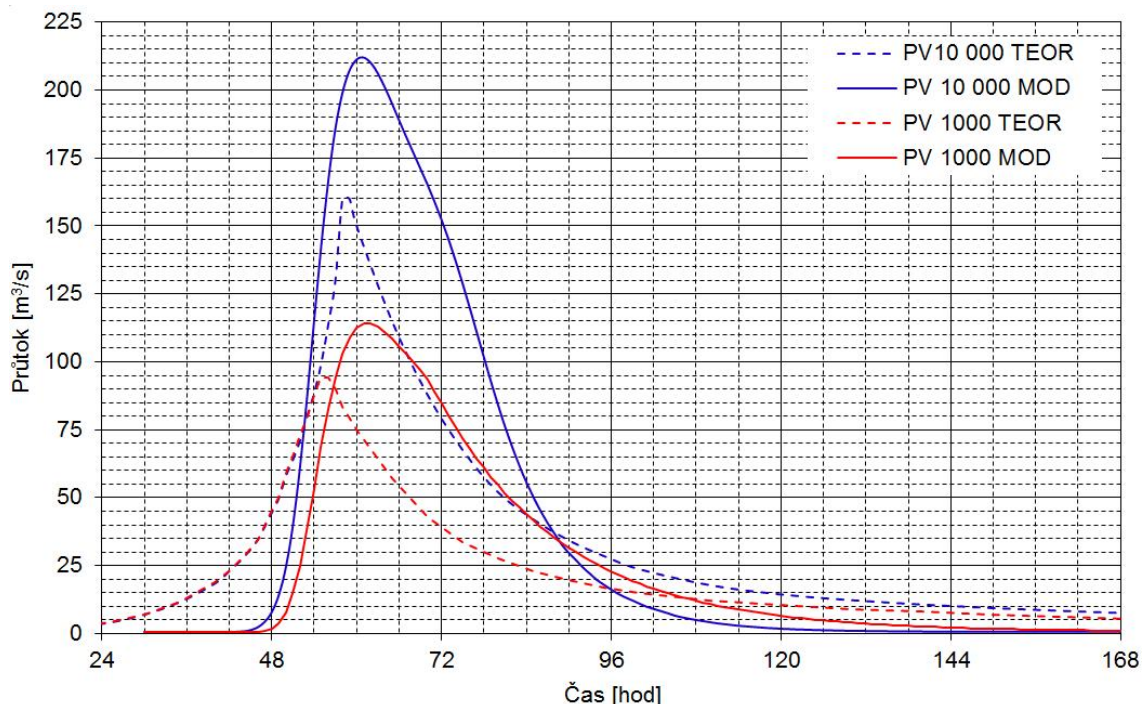
	PV ₅₀₀	PV ₁₀₀₀	PV ₂₀₀₀	PV _{10 000}
$Q_{N MOD} [m^3]$	92,5	114,3	140,8	212,0
$Q_{N TEOR} [m^3]$	78,8	94,1	111,3	160,0
$W_N [mil. m^3]$	11,1	12,7	14,7	19,6



Obr. 01. Hydrogramy vybraných PV_N TEOR dle hydrologické studie [5].



Obr. 02. Hydrogramy vybraných PV_N MOD dle hydrologické studie [5].



Obr. 03. Srovnání vybraných hydrogramů $PV_{N\text{TEOR}}$ a $PV_{N\text{MOD}}$ dle hydrologické studie [5].

Z uvedených hydrologických údajů je zřejmé, že pro návrh parametrů nového bezpečnostního zařízení je směrodatná $KPV_{10\,000\text{ MOD}}$ (vyšší kulminační průtok, nepříznivější rozdělení objemu v čase, strmější vzestupná větev). Na pracovním jednání 18. 1. 2013 bylo dohodnuto, že pro návrh parametrů nového bezpečnostního objektu budou uvažovány PV stanovené pomocí srážkoodtokového modelu (označovány $PV_{N\text{MOD}}$). U všech perspektivních variant návrhů nového bezpečnostního zařízení byl proveden přepočít transformace $PV_{1000\text{ MOD}}$ pro případ, že by nejvyšší hladina při transformaci uvedené PV v součtu s výškou výběhu vlny dosahovala vyšší úrovně než nejvyšší hladina při $PV_{10\,000\text{ MOD}}$.

3 VÝPOČETNÍ PROSTŘEDKY

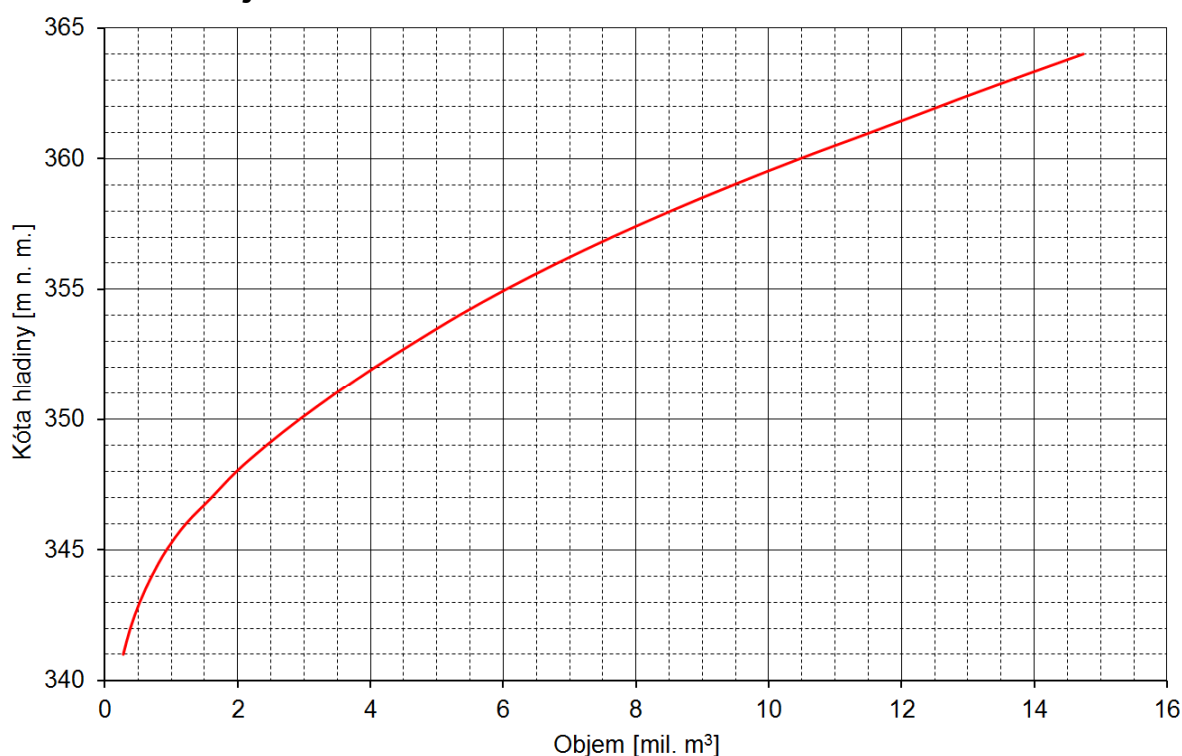
Výpočet měrné křivky koryta v podhrází a návrh parametrů nového skluzu od bezpečnostního přelivu byl proveden v jednodimenzionálním (1D) výpočetním programu HEC-RAS 4.1 (HydrologicEngineeringCenter's River AnalysisSystem). Jedná se o software umožňující výpočet ustáleného i neustáleného 1D proudění v umělých i přirozených korytech a přilehlých inundačních územích. Základním vstupem je geometrický model zájmového koryta tvořený příčnými řezy a podélným profilem. Program umožňuje zadání objektů na toku (mosty, propustky, jezy) a také zohlednění vzájemného ovlivnění více hydrotechnických objektů na toku.

Měrné křivky funkčních objektů v současném stavu byly odvozeny a parametry navrhovaných funkčních objektů byly stanoveny pomocí tabulkového editoru Microsoft Excel, případně byly doplněny o podpůrné výpočty provedené v programovém prostředí Microsoft Visual Basic.

Pro výpočty transformací povodňových vln byl použit bilanční numerický model sestavený v programovém prostředí Microsoft Visual Basic [22]. V každém časovém kroku (uvažováno 60 sec) je z hydrogramu povodně vyhodnocen objem přítoku, následně je dle úrovně hladiny, manipulačních pravidel, charakteristik spodních výpustí, přelivu a případně vlnolamu na koruně hráze stanoven objem odtoku v aktuálním časovém kroku. Bilancováním objemu vody v nádrži na začátku časového kroku a objemu přítoku a odtoku je stanoven objem vody v nádrži na konci časového kroku, kterému odpovídá úroveň výchozí hladiny pro navazující časový krok.

4 POSOUZENÍ SOUČASNÉHO STAVU

4.1 Čára objemů nádrže

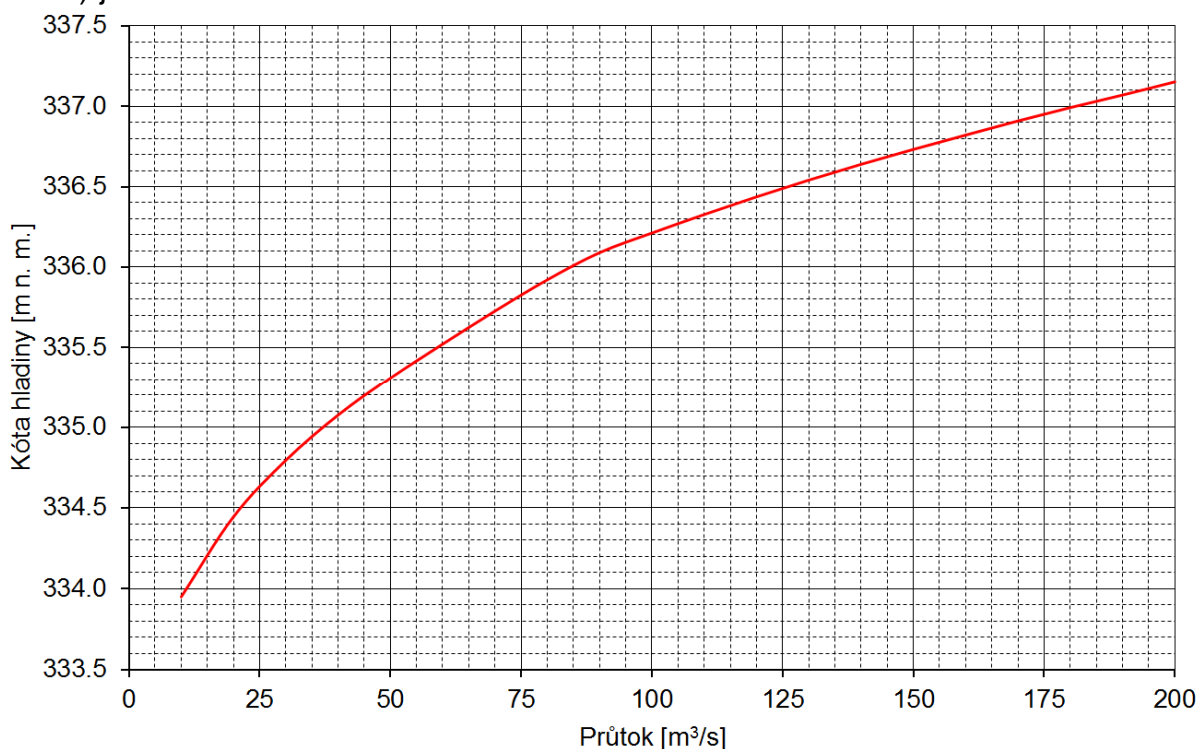


Obr. 04. Čára objemů nádrže dle MŘ [4].

4.2 Měrná křivka koryta pod hrází

Měrná křivka koryta pod hrází (v prostoru prahu vývaru pod skluzem) byla odvozena na základě výpočtu nerovnoměrného ustáleného proudění provedeného v programu HEC-RAS. Do modelu bylo zadáno 10 údolnicových příčných profilů ve vzdálenostech cca 50 m, odvozených z geodetického zaměření [11], dále byly interpolovány mezilehlé profily ve vzdálenostech cca 10 m. Hodnota stupně drsnosti dle Manninga byla uvažována pro koryto 0,040 a pro inundační území 0,060. Jako

dolní okrajová podmínka byla uvažována hladina pro ustálené rovnoměrné proudění odpovídající podélnému sklonu 1,5‰, vzhledem k délce modelovaného úseku (cca 370 m) je vliv DOP na dokládanou MK minimální.



Obr. 05. Měrná křivkakoryta pod hrází.

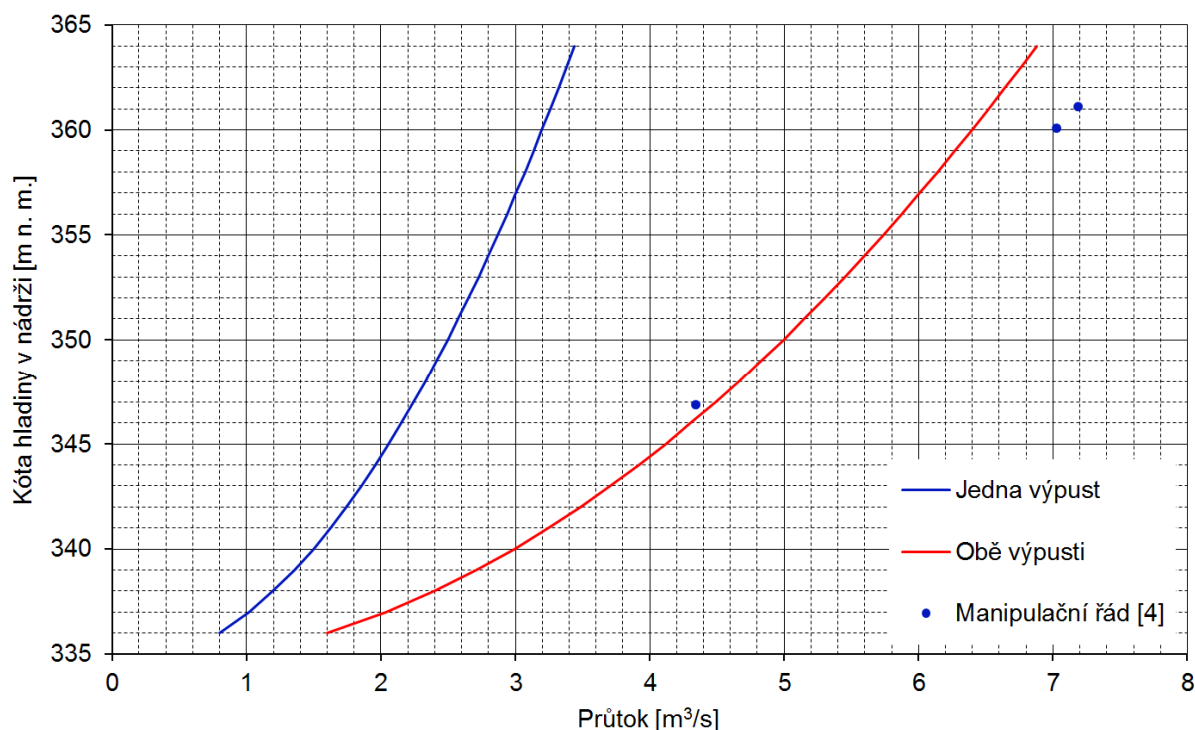
4.3 Spodní výpusti

Měrné křivky spodních výpustí v hrázi byly odvozeny za předpokladu jejich plného otevření podle rovnic (01) a (02). Parametry výpustí byly uvažovány dle MŘ [4], součinitele místních ztrát a ztrát třením po délce byly stanoveny dle doporučení odborné literatury [25], [26] a [29]. Měrné křivky spodních výpustí jsou doloženy na obr. 06. Ve výpočtu bylo zohledněno ovlivnění spodní vodou dle křivky na obr. 05. Vzhledem k délce výpustí je zřejmé, že nejvýznamnější vliv na kapacitu má ztráta třením po délce. Odhad hodnoty ztrátového součinitele λ tedy zásadně ovlivňuje kapacitu, respektive průběh měrné křivky. Relativně bezpečná hodnota 0,018 způsobuje mírné snížení vypočtené kapacity ve srovnání s manipulačním řádem. Uvedený rozdíl má na posouzení průchodu KPV i na návrh parametrů nového bezpečnostního objektu zanedbatelný vliv.

$$Q = \mu \cdot S_v \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (01)$$

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \lambda \cdot \frac{L}{D} + \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot \frac{S_v^2}{S_i^2}}} \quad (02)$$

Q	Průtok		[m ³ /s]
S_v	Plocha koncového průřezu spodní výpusti	0,333	[m ²]
S_i	Plocha průřezu v místě vzniku ztráty		[m ²]
g	Tíhové zrychlení	9,81	[m/s ²]
H	Rozdíl mezi osou koncového průřezu spodní výpusti nebo hladinou dolní vody a hladinou vody v nádrži		[m]
α	Coriolisovo číslo	1,05	[-]
λ	Součinitel ztráty třením	0,018	[-]
L	Délka potrubí	130	[m]
D	Průměr potrubí	0,7	[m]
n	Počet místních ztrát	5	[-]
ξ_c	Součinitel místní ztráty – česle	0,129	[-]
ξ_T	Součinitel místní ztráty – tabulový uzávěr	0,100	[-]
ξ_H	Součinitel místní ztráty – hradidlový uzávěr	0,100	[-]
ξ_V	Součinitel místní ztráty – vtok	0,080	[-]
ξ_K	Součinitel místní ztráty – kuželový uzávěr	1,300	[-]
μ	Součinitel výtoku	0,429	[-]



Obr. 06. Měrné křivky spodních výpustí v hrázi a jejich porovnání s kapacitou dle MŘ [4].

4.4 Bezpečnostní přeliv

Při odvození měrné křivky přelivu (MKP) byly použity zejména tyto výpočtové vztahy:

- (03)- stanovení přepadového množství;
- (04)- stanovení efektivní délky přelivné hrany;
- (05)- odvození průběhu hladin ve spadišti metodou dle Hindse [26];
- (06)- odvození měrné křivky kritického profilu na konci spadiště metodou dle Kybasta [28].

$$Q = m \cdot b_0 \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{\frac{3}{2}} \cdot \sigma_z \quad (03)$$

$$b_0 = b - 0,1 \cdot n \cdot \xi \cdot h \quad (04)$$

$$\Delta h = \frac{Q_i}{g} \cdot \frac{v_i + v_{i+1}}{Q_i + Q_{i+1}} \cdot \left(\Delta v + \frac{q \cdot v_{i+1} \cdot \Delta x}{Q_i} \right) \quad (05)$$

$$h_{krP} = \left(h_{kr} + \frac{v_{kr}^2}{2g} \right) \cdot k \quad (06)$$

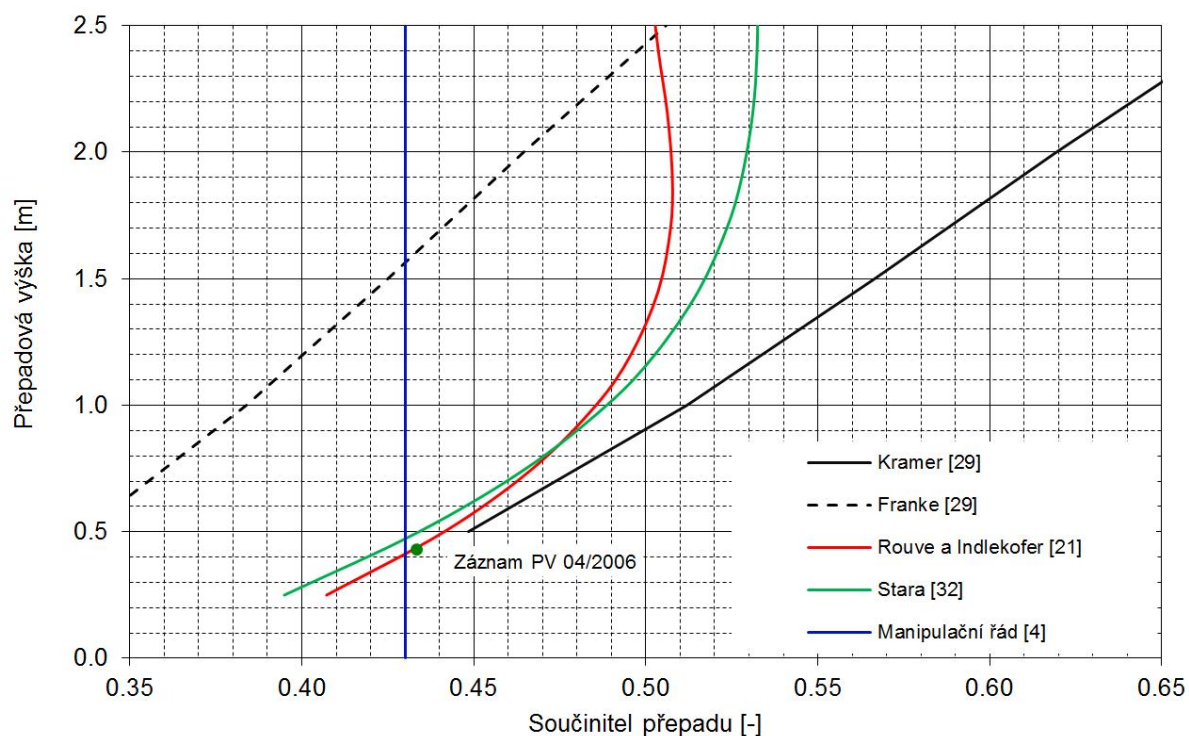
Q	Průtok		[m ³ /s]
Q_i, Q_{i+1}	Průtok v profilech i a i+1		[m ³ /s]
q	Specifický průtok při přepadu přes přelivnou hranu		[m/s ²]
m	Součinitel přepadu		[-]
b	Délka přelivné hrany	26,6	[m]
b_0	Efektivní délka přelivné hrany		[m]
g	Tíhové zrychlení	9,81	[m/s ²]
h	Přepadová výška		[m]
h_{kr}	Kritická hloubka v návodním profilu mostu přes spadiště.		[m]
h_{krP}	Hloubka v začátku spadiště.		[m]
k	Sumární ztrátový součinitel při výpočtu dle [28]	1,13 - 1,15	[-]
Δh	Rozdíl hladin v profilech i a i+1		[m]
ξ	Součinitel kontrakce	0,7	[-]
n	Počet kontrakcí	1	[-]
σ_z	Součinitel zatopení		[-]
v_i, v_{i+1}	Střední profilová rychlost v profilech i a i+1		[m/s]
Δv	Rozdíl středních profilových rychlostí v profilech i a i+1		[m]
Δx	Délka úseku spadiště		[m]

Kapacita stávajícího přelivu při zahrnutí vlivu proudění ve spadišti je významně ovlivněna především těmito faktory:

- hodnotou součinitele přepadu - nejvýznamněji se projevuje v dolní části MK (cca do průtoku 65 m³/s), kdy přepad není významně ovlivněn úrovní hladiny ve spadišti,
- zatopením dolní vodou (úrovní hladiny ve spadišti) - projevuje se cca od průtoku 60 m³/s, s přibývajícím průtokem se vliv zatopení zvyšuje;
- kapacitou tzv. „kritického profilu“ v místě návodního profilu mostu přes spadiště (začátek skluzu).

Odvození hodnoty součinitele přepadu

Pro odvození maximálně přílehavé hodnoty součinitele přepadu přelivu se zaoblenou přelivnou hranou byl v rámci [31] proveden rozbor dostupných podkladů a údajů z odborné literatury. Výsledky rozboru byly dále konzultovány s Prof. Šulcem a Prof. Říhou (Ústav vodních staveb, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně). V rámci uvedeného rozboru byly zohledněny i výsledky záznamů průběhů reálných povodní, během kterých docházelo k přepadu přes bezpečnostní přeliv. Z rozboru a konzultací vyplývá, že stanovení hodnoty součinitele přepadu dle Rouveho a Indlekofera [21], případně dle Stary [32] vystihuje charakter hydraulického jevu přílehavěji než standardně používané výpočetní vztahy dle Kramera [29], viz obrázek 07. Při výpočtu měrné křivky přelivu byla použita hodnota součinitele přepadu odvozená dle Rouveho a Indlekofera.



Obr. 07. Závislost součinitele přepadu na přepadové výšce.

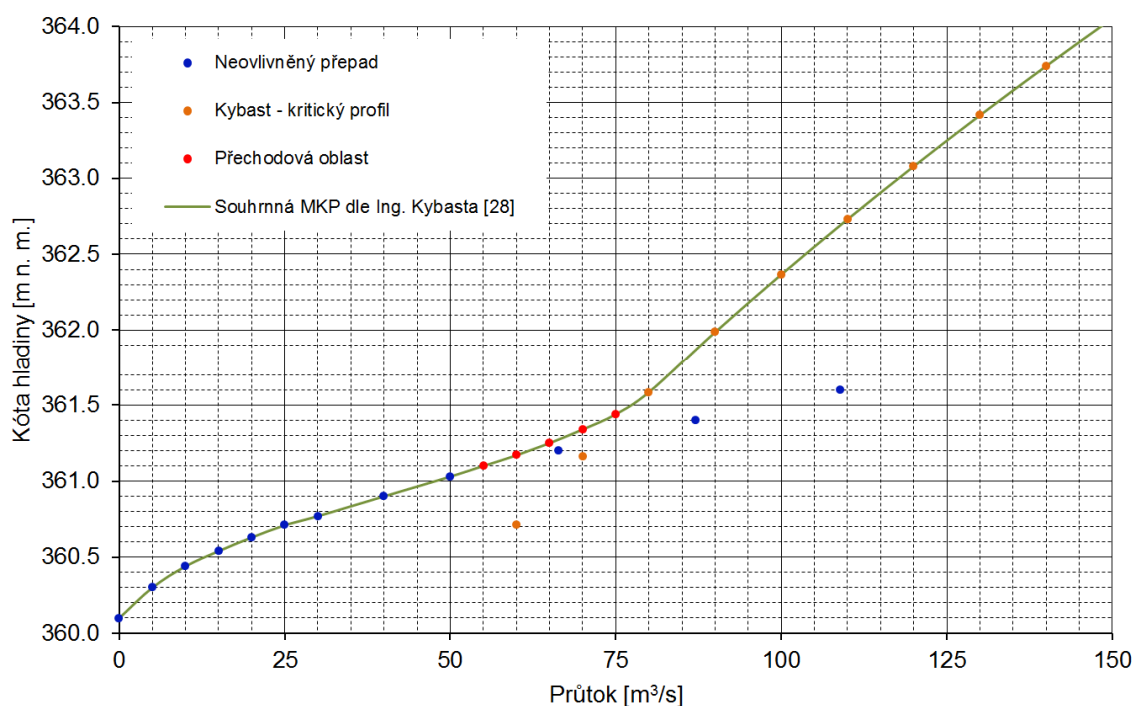
Posouzení vlivu zatopení přepadu dolní vodou

Výpočet průběhu hladin ve spadišti a odvození měrné křivky přepadu zohledňující vliv zatopení byl proveden metodou dle Hindse [26], za předpokladu vytvoření kritické hloubky v profilu konce spadiště. Spadiště bylo po délce rozděleno na úseky délky 2,0 m, pro tyto úseky byla v závislosti na půdorysném uspořádání přelivu a spadiště stanovena délka přelivné hrany. Iteračním postupem byl na základě úrovně hladiny ve spadišti, respektive míře zatopení jednotlivých úseků přelivu stanoven dílčí přepad přes každý z úseků přelivné hrany. Pro průtok spadištěm měnící se po délce byla následně stanovena upřesněná křivka průběhu hladiny. Po provedení přiměřeného počtu iteračních kroků (standardně cca 7) byl výpočet ukončen.

Posouzení kapacity tzv. „kritického profilu“

V případě, že hladina v nádrži podstatně překračuje návrhovou přepadovou výšku přelivu, dochází k natolik významnému zatopení přepadu dolní vodou, že se pro stanovení kapacity bezpečnostního objektu stává limitující kapacita profilu na návodní straně mostu přes spadiště (začátek skluzu).

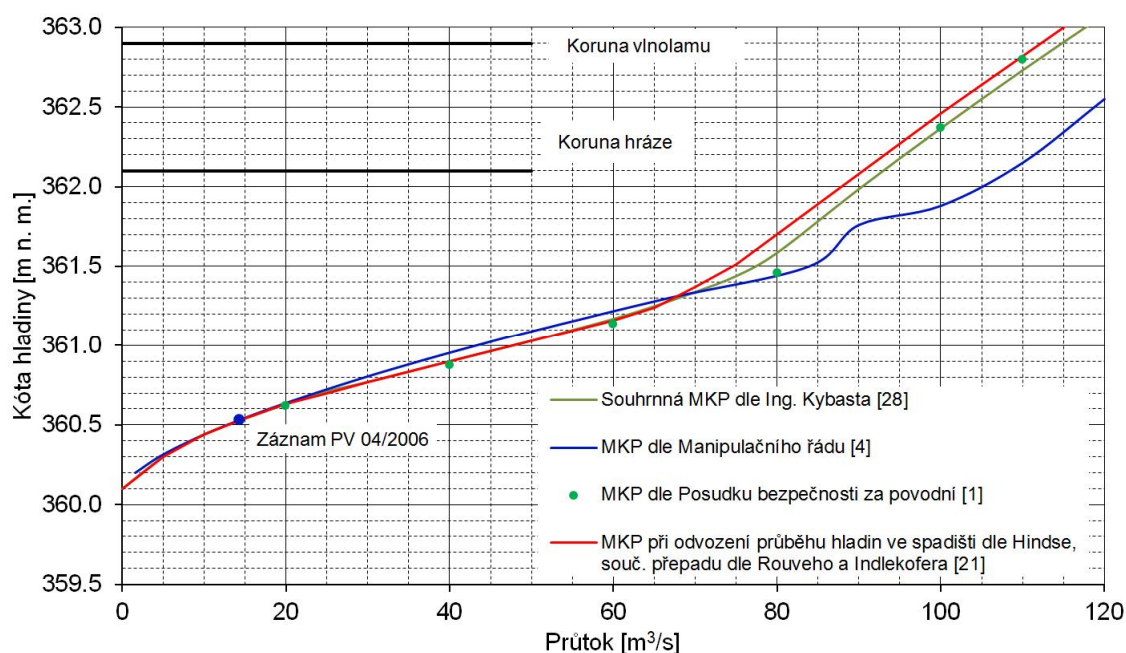
Pro posouzení teoretické maximální kapacity kritického profilu předpokládaného v návodním líci mostu přes spadiště byl proveden odhad souhrnné měrné křivky bezpečnostního přelivu a spadiště dle metodiky dle Ing. Kybasta, viz podklad [28] a výpočetní vztah (06). Metoda vychází z předpokladu, že je možné celkovou kapacitu objektu stanovit na základě dvou dílčích měrných křivek (MK přepadu přes nezatopený přeliv a MK kritického profilu) a odborného odhadu sumární měrné křivky včetně přechodové oblasti mezi oběma uvedenými MK. Dílčí měrné křivky a sumární měrná křivka jsou znázorněny na obr. 08.



Obr. 08. Odvození kapacity bezpečnostního přelivu a spadiště dle metodiky Ing. Kybasta [28].

Odvození měrné křivky přelivu

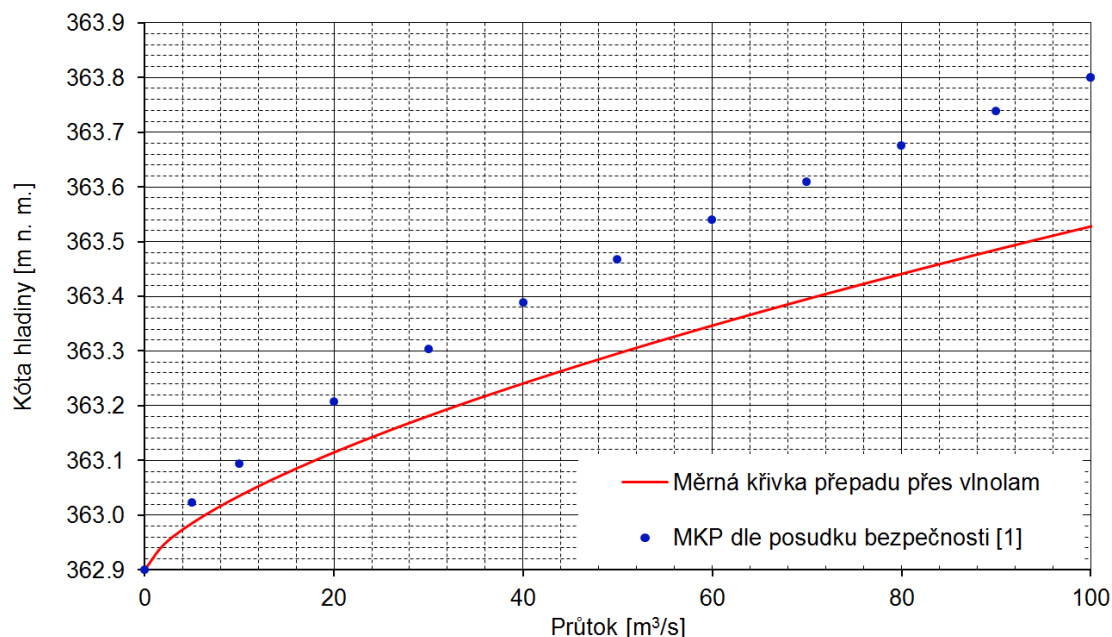
V grafu na obrázku 09 jsou doloženy tyto měrné křivky převzaté ze stávajících podkladů a odvozené dle výše popsanych metod (viz také legendu grafu).



Obr. 09. Měrné křivky stávajícího bezpečnostního přelivu, Při výpočtech transformací PV v současném stavu byla použita červeně vyznačená křivka.

4.5 Přepad přes korunu vlnolamu

MKP přes vlnolam byla odvozena pro potřeby výpočtu průběhu transformace KPV v případě, kdy hladina v nádrži překročí kótu 362,90 m n. m. (horní hrana vlnolamu). Přepad přes vlnolam byl stanoven dle rovnice (03) hodnota součinitele přepadu byla uvažována 0,36, délka přelivné hrany byla uvažována 126 m. V grafu na obrázku 10 je doložena měrná křivka stanovená pro uvedené parametry, dále je zde doložena měrná křivka převzatá z Posudku bezpečnosti VD za povodní [1] (hodnota odpovídajícího součinitele přepadu je 0,21).



Obr. 10. Měrná křivka přepadu přes vlnolam na koruně hráze.

4.6 Transformace povodňových vln

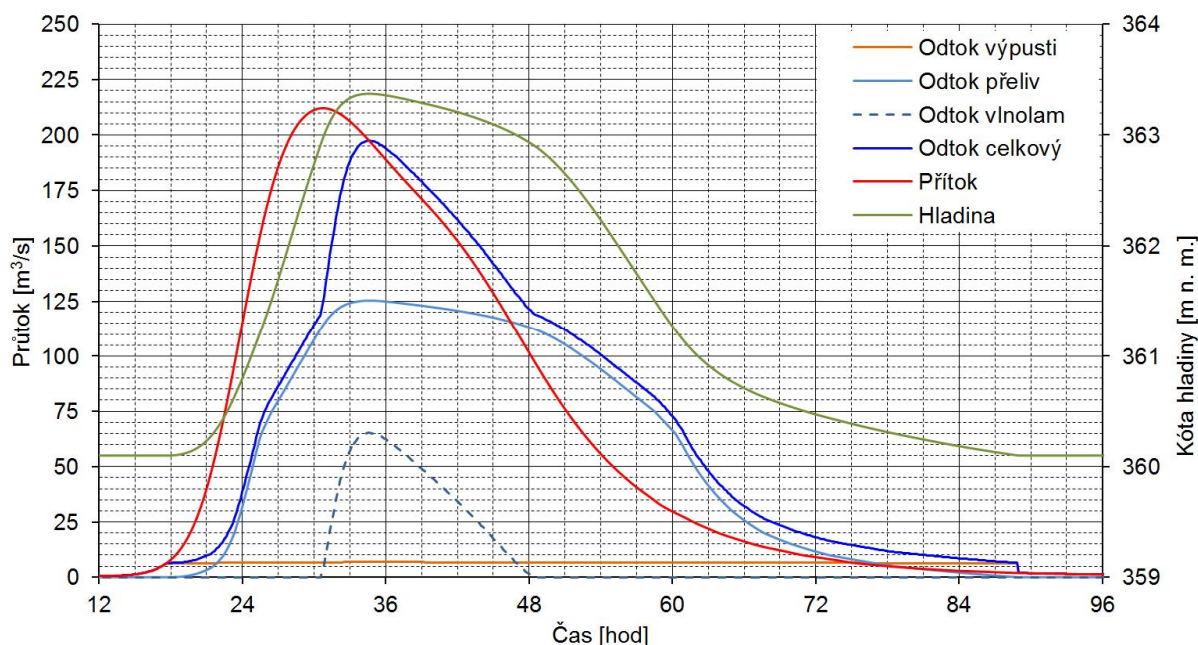
Pro výpočet transformací PV v současném stavu byl použit výpočetní nástroj [22] popsany v kapitole 3. Vzhledem k relativně nízké kapacitě spodních výpustí je zřejmé, že případné manipulace nemají zásadní vliv na průběh transformací. Oproti MŘ [4] bylo předpokládáno, že během vzestupné větve PV bude vyrovnáván přítok s odtokem až do plného otevření spodních výpustí, k uzavírání výpustí dojde po poklesu hladiny na výchozí úroveň.

V tab. 02 jsou uvedeny výsledky transformace PV_{100 MOD} dle MŘ. Je patrné, že průběh transformace uvedené PV dle var. S_{1.1} je odlišný - mj. díky vyšší kapacitě přelivu stanovené v rámci této studie je odtok přelivem a tím i celkový odtok vyšší než uvádí MŘ. Rozdílné výsledky transformací PV_{100 MOD} byly konzultovány s objednatelem (Ing. Krejčí, Ing. Viskot), rozdíl se nepodařilo zdůvodnit.

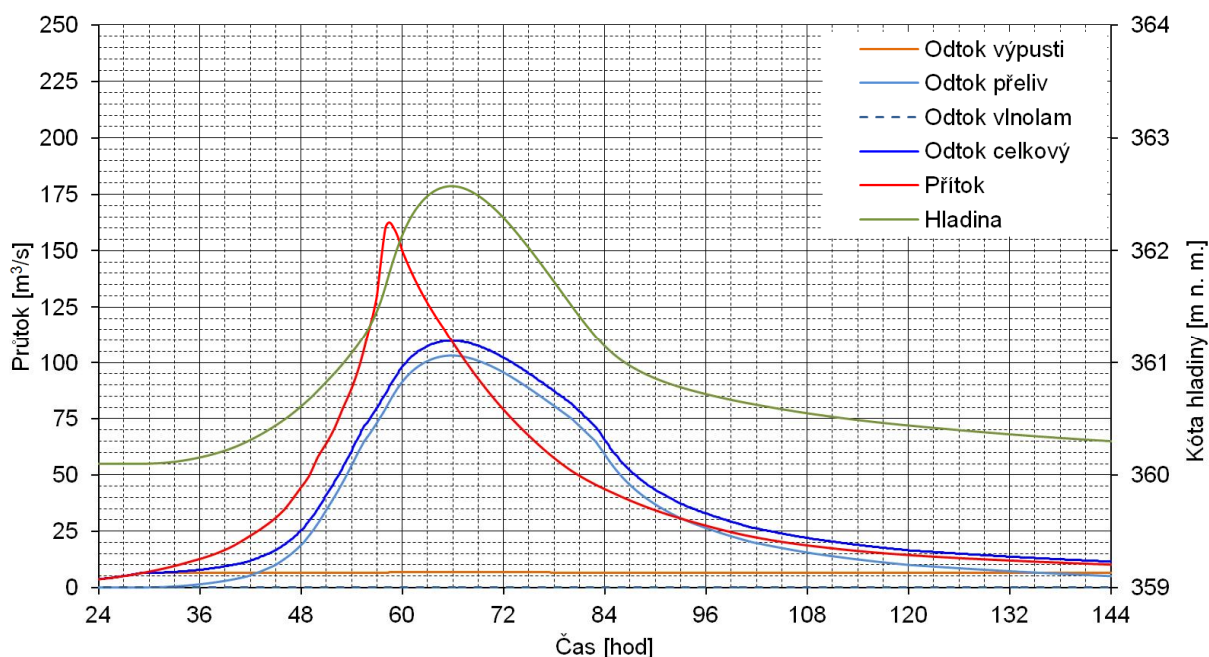
Tab. 02. Výsledky transformací PV₁₀₀₀₀ stávajícími výpustmi a bezpečnostním přelivem.

Var.	PV	H _{VÝCH}	Max. přítok	Max. odtok celkový	Max. odtok výpusti	Max. odtok přeliv	Max. odtok vln.	Max. kóta	Poznámka
S _{1.1}	10 000 MOD	360.10	212.1	197.4	6.8	125.4	65.2	363.37	MKP uvažována jako červená křivka na obr. 09
	1000 MOD	360.10	114.5	93.8	6.6	87.2	0	361.97	
	500 MOD	360.10	92.5	80.4	6.6	73.8	0	361.48	
	100 MOD	360.10	49.1	44.5	6.5	37.9	0	360.87	
S _{1.2}	10 000 TEOR	360.10	162,5	109.8	6,7	103.1	0	362.57	
S _{2.1}	10 000 MOD	360.10	212.1	197.0	6.8	128.2	62.0	363.36	MKP uvažována dle metodiky Ing. Kybasta - zelená křivka na obr. 09
S _{2.2}	10 000 MOD	360.10	212.1	191.7	6.8	132.2	52.7	363.49	MKP uvažována dle S _{2.1} , MK vln. uvažována dle Posudku bezp. za povodní [1] - modré body na obr. 10
-	10 000 MOD	360.10	212.1	188.7	neuvedeno			363.50	Hodnoty dle posudku bezpečnosti [1]
-	100 MOD	360.10	49.1	41.8	neuvedeno			360.98	Hodnoty dle MŘ [4]

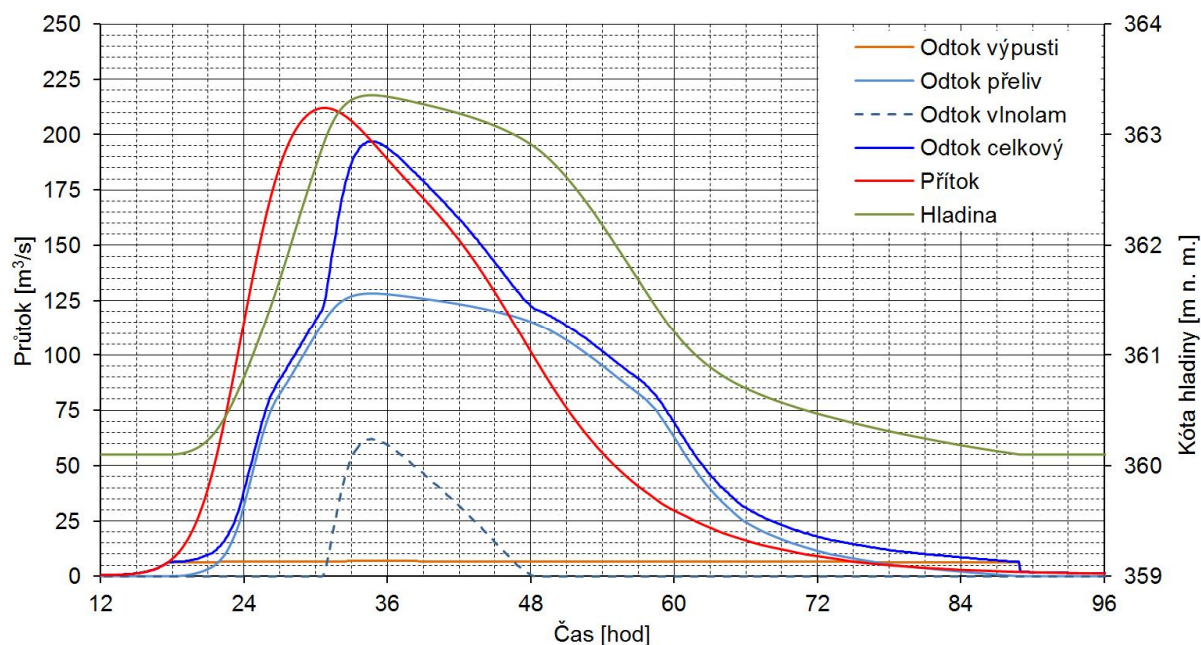
V tabulce 02a v grafech na obrázcích 11 až 14 jsou doloženy výsledky transformací vybraných PV, označení variant „S“ představuje současný stav.



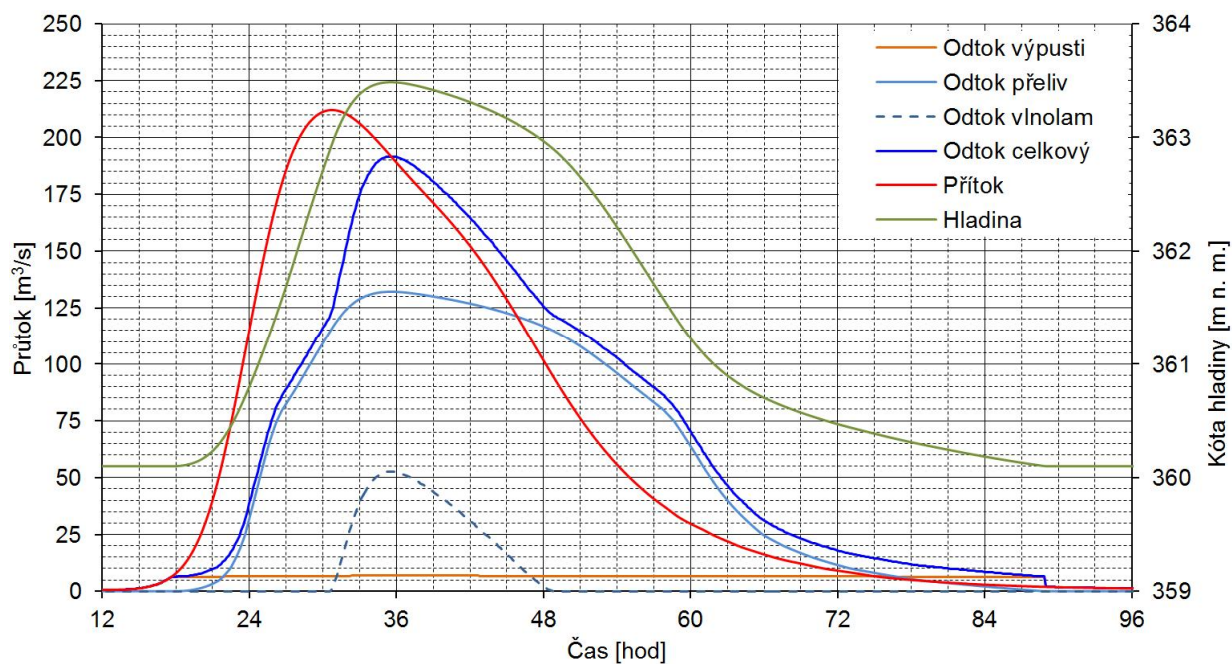
Obr. 11. Varianta S_{1.1}, transformace PV_{10 000 MOD}, MKP uvažována jako červená křivka na obr. 09.



Obr. 12. Varianta S_{1,2}, transformace PV_{10 000} TEOR, MKP uvažována jako červená křivka na obr. 09.



Obr. 13. Varianta S_{2,1}, transformace PV_{10 000} MOD, MKP uvažována dle metodiky Ing. Kybasta - zelená křivka na obr. 09



Obr. 14. Varianta S_{2.2}, transformace PV_{10 000 MOD}, MKP uvažována dle metodiky Ing. Kybasta - zelená křivka na obr. 09, MK vlnolamu uvažována dle Posudku bezpečnosti za povodní [1] - modré body na obr. 10.

5 NÁVRH PARAMETRŮ NOVÉHO BEZPEČNOSTNÍHO OBJEKTU

5.1 Bezpečnostní přeliv a spadiště

Návrh rozměrů přelivu a spadiště byl v rámci předkládané studie proveden v několika na sebe navazujících etapách.

Na pracovním jednání 18. 11. 2013 byly prezentovány dílčí výsledky (varianty N.1.1 až N.2.3) dokládající potřebnou délku přelivné hrany při uvažování:

- zachování stávající úrovně přelivu, nebo jeho snížení o 1,0 m;
- šířky spadiště v rozpětí 6,5; 8,0 a 10,0 m;
- úrovně dna spadiště odpovídající současnému stavu a zahloubení spadiště o 0,5 m;
- KMH na kótě cca 362,10 m n. m.

V návaznosti na výsledky uvedeného jednání byla provedena optimalizace rozměrů bezpečnostního objektu v rámci dále uvedených omezení:

- zahloubení dna spadiště 0,0 a 0,5 m oproti současnému stavu (pro informaci: stávající kóta dna konce spadiště je 356,20 m n. m.),
- nová úroveň koruny hráze 362,30 a 362,80 m n. m. (odpovídá MBH, respektive KMH),
- úroveň přelivné hrany 360,10 (současný stav), 359,60 (stav - 0,5 m) a 359,10 m n. m. (stav - 1,0 m),
- šířka spadiště 6,5 a 8,0 m (pro informaci: šířka spadiště v současném stavu 4,0 m),
- délka přelivné hrany variantně tak, aby bylo dosaženo požadované úrovně MBH a současně nebyla narušena opěra lávky k odběrné věži (pro informaci: délka přelivné hrany v současném stavu je 26,6 m, při délce přelivné hrany >35 m by došlo k dotčení opěry lávky, varianty vyžadující větší délku přelivu byly z dalšího posuzování vyloučeny).

Tab. 03. Základní parametry přelivu a spadiště a výsledky transformací vybraných PV_{MOD} ve variantách dle dohod z jednání 18. 1. 2013.

Var.	Kóta přelivu	MBH (KMH)	Dno spad.	Šířka spad.	Délka přelivu	PV _{MOD}	Max. přítok	Max. odtok celkový	Max. odtok vypusti	Max. odtok přeliv	Max. kóta
N 3.1	360.10	362.30	356.20	6.50	>35.0						
N 3.2				8.00	>35.0						
N 3.3			355.70	6.50	>35.0						
N 3.4				8.00	>35.0						
N 3.5		362.80	356.20	6.50	>35.0						
N 3.6				8.00	29.0	10 000	212.1	185.8	6.7	179.0	362.81
						1 000	114.5	107.7	6.6	101.1	361.46
N 3.7			355.70	6.50	>35.0						
N 3.8				8.00	23.0	10 000	212.1	189.7	6.7	182.9	362.80
						1 000	114.5	105.8	6.6	99.2	361.66
N 4.1	359.60	362.30	356.20	6.50	>35.0						
N 4.2				8.00	>35.0						
N 4.3			355.70	6.50	>35.0						
N 4.4				8.00	29.0	10 000	212.1	186.1	6.7	179.4	362.32
						1 000	114.5	107.6	6.5	101.1	360.96
N 4.5		362.80	356.20	6.50	>35.0						
N 4.6				8.00	21.5	10 000	212.1	181.0	6.7	174.3	362.80
						1 000	114.5	103.6	6.6	97.0	361.26
N 4.7			355.70	6.50	27.0	10 000	212.1	177.3	6.7	170.6	362.82
						1 000	114.5	104.1	6.5	97.6	361.10
N 4.8				8.00	17.5	10 000	212.1	184.1	6.7	177.3	362.80
						1 000	114.5	102.7	6.6	96.2	361.42
N 5.1	359.10	362.30	356.20	6.50	>35						
N 5.2				8.00	>35						
N 5.3			355.70	6.50	>35						
N 5.4				8.00	22.0	10 000	212.1	181.4	6.7	174.7	362.29
						1 000	114.5	103.7	6.5	97.2	360.74
N 5.5		362.80	356.20	6.50	>35						
N 5.6				8.00	17.0	10 000	212.1	176.3	6.7	169.5	362.78
						1 000	114.5	98.7	6.5	92.1	361.05
N 5.7			355.70	6.50	20.0	10 000	212.1	173.0	6.7	166.3	362.81
						1 000	114.5	99.2	6.5	92.7	360.94
N 5.8				8.00	14.0	10 000	212.1	178.4	6.7	171.7	362.77
						1 000	114.5	99.5	6.5	92.9	361.18

Souběžně s uvedenými výpočty probíhal přepočítání ovlivnění zabezpečení úrovní hladiny v nádrži a odběrů z nádrže (nadlepšování průtoku ve Svitavě) pro varianty předpokládající snížení úrovně přelivné hrany, respektive zásobní hladiny (zpracovatel: Ing. Viskot, PMO). Podle informace předané zástupcem objednatele (Ing. Krejčí) na pracovním jednání 6. 3. 2013 je nejnižší přípustná kóta nového přelivu (tzn. H_Z) 359,60 m n. m.

Z variant uvedených v tabulce 03 byly zhotovitelem jako perspektivní doporučeny N 3.6 a N 4.6. Vzhledem k úrovni podlahy strojovny a lávky ke strojovně

(362,60 m n. m.) byly parametry přelivu a spadiště v uvedených variantách dále optimalizovány tak, aby byl pro přeliv maximálně využit prostor po břehovou opěru lávky a současně KMH nepřekročila kótu podlahy strojovny. V obou var byla délka přelivu prodloužena na 35,0 m, pro dosažení potřebného snížení KMH bylo u var N 3.6 nezbytné navrhnout ještě zahloubení dna spadiště o 0,2 m na kótu 356,00 m n. m. Parametry bezpečnostního objektu ve var N 3.6.3 a N 4.6.1 jsou doloženy v tabulce 04.

Na pracovním jednání 6. 3. 2013 byly uvedené výsledky prezentovány objednateli. Bylo dohodnuto, že vzhledem ke komplikacím souvisejícím s případným zahlubováním dna spadiště bude doplněna další modifikace var N 3.6, která zachová stávající úroveň dna spadiště a snížení KMH na kótu podlahy strojovny (362,60 m n. m.) bude dosaženo zvětšením šířky spadiště. Viz var N 3.6.4 v tabulce 04.

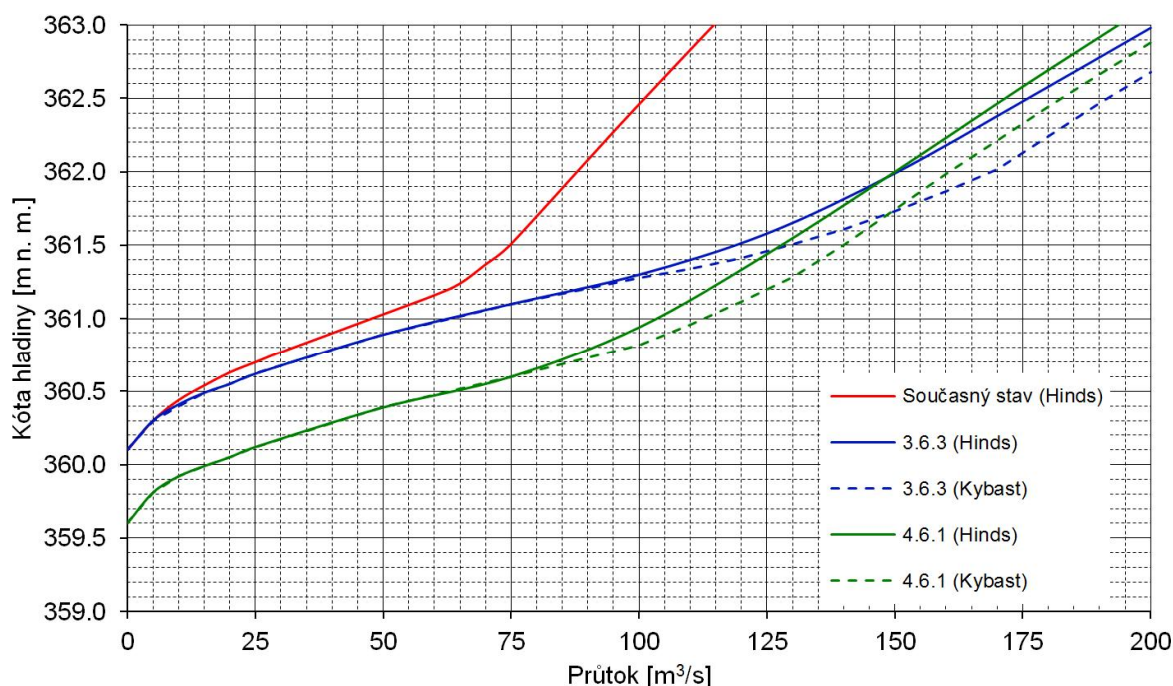
Tab. 04. Základní parametry přelivu a spadiště a výsledky transformací vybraných PV v perspektivních variantách prezentovaných na jednání 6. 3. 2013, včetně var. N 3.6.4 doplněné na základě výsledků uvedeného jednání. Ve variantách, které mají ve sloupci „Max. odtok výpust“ uvedenu hodnotu „0“ nebyl při transformaci PV uvažován vliv spodních výpustí.

Var.	Kóta přelivu	MBH (KMH)	Dno spad.	Šířka spad.	Délka přeliv	PV	Max. přítok	Max. odtok	Max. odtok výpust	Max. odtok přeliv	Max. kóta
N 3.6.0	360.10	362.80	356.20	8.0	29.0	10 000 MOD	212.1	185.8	6.7	179.0	362.81
N 3.6.1	360.10	362.71	356.20	8.0	35.0	10 000 MOD	212.1	185.5	6.7	178.7	362.71
N 3.6.2	360.10	362.65	356.10	8.0	35.0	10 000 MOD	212.1	186.5	6.7	179.8	362.65
N 3.6.3	360.10	362.60	356.00	8.0	35.0	10 000 MOD	212.1	187.6	6.7	180.8	362.60
						10 000 MOD	212.1	186.7	0.0	186.7	362.71
						10 000 TEOR	162.5	135.9	6.6	129.3	361.65
						1 000 MOD	114.5	108.8	6.6	102.3	361.33
						100 MOD	49.1	45.6	6.5	39.2	360.77
N 3.6.4	360.10	362.60	356.20	8.5	35.0	10 000 MOD	212.1	188.1	6.7	181.4	362.58
						10 000 MOD	212.1	187.2	0.0	187.2	362.70
						10 000 TEOR	162.5	135.9	6.6	129.3	361.65
						1 000 MOD	114.5	108.9	6.6	102.3	361.33
						100 MOD	49.1	45.7	6.5	39.2	360.77
N 4.6.0	359.60	362.80	356.20	8.0	21.5	10 000 MOD	212.1	181.0	6.7	174.3	362.80
N 4.6.1	359.60	362.55	356.20	8.0	35.0	10 000 MOD	212.1	180.4	6.7	173.7	362.55
						10 000 MOD	212.1	179.7	0.0	179.7	362.69
						10 000 TEOR	162.5	127.2	6.6	120.6	361.35
						1 000 MOD	114.5	105.5	6.5	99.0	360.93

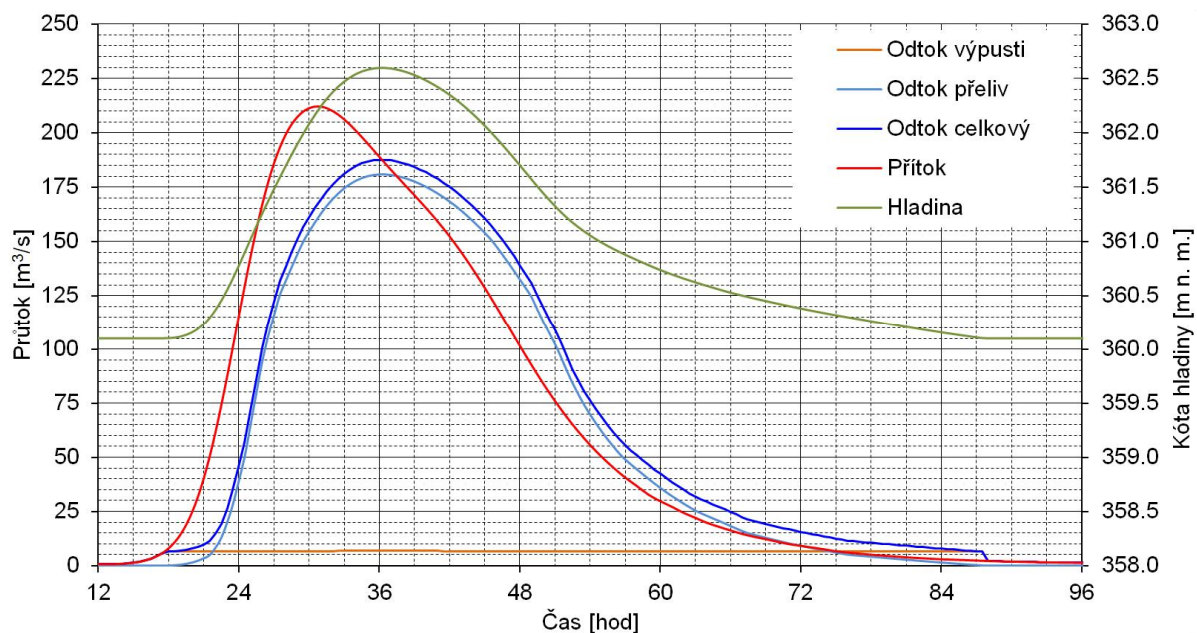
						100 MOD	49.10	45.75	6.43	39.32	360.27
--	--	--	--	--	--	------------	-------	-------	------	-------	--------

V grafu na obrázku 15 jsou uvedeny měrné křivky přelivů pro var N 3.6.3 a N 4.6.1. MKP pro var N 3.6.4 je téměř identická s MKP pro var N 3.6.3 a pro lepší přehlednost grafu není dokládána. V grafech na obrázcích 16 až 21 jsou uvedeny výsledky transformací PV_{10 000 MOD} a PV_{1000 MOD}.

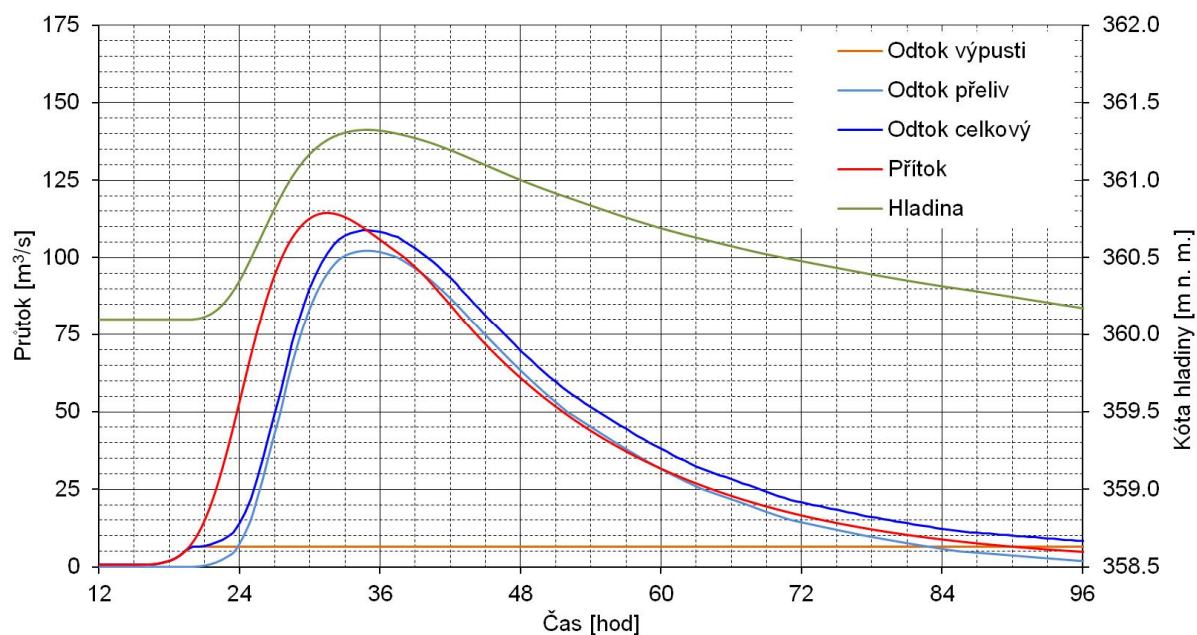
Na pracovním jednání 6. 3. 2013 proběhla diskuze k metodice stanovení měrné křivky přelivu. Ve studii byla použita metodika dle Hindse, výsledky vybraných variant byly porovnány v MK stanovenou dle Ing. Kybasta. MK dle Hindse udává v úseku ovlivněném zatopením dolní vodou o 0 až 10% nižší kapacitu než MK stanovená dle Kybasta. Na uvedeném jednání bylo dohodnuto, že pro dokončení studie bude použita metodika dle Hindse a případné zmenšení rozměrů přelivu a spadiště bude provedeno na základě výsledků fyzikálního výzkumu.



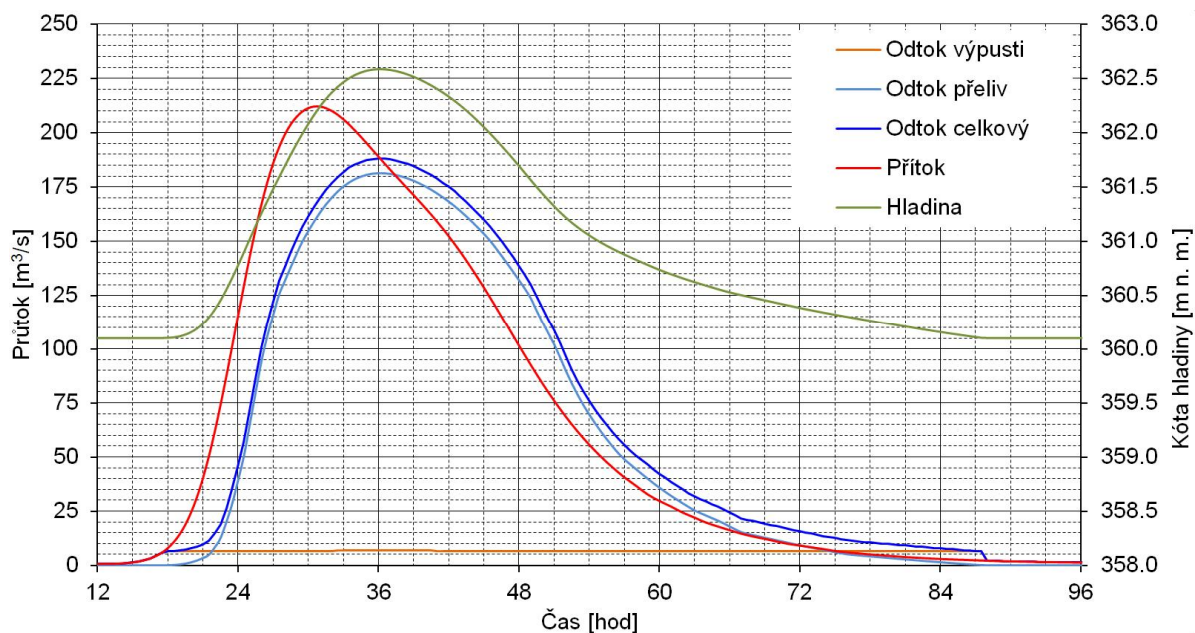
Obr. 15. Měrné křivky přelivů pro var N 3.6.3 a N 4.6.1 stanovené dle Hindse (plné čáry) a dle Kybasta (čárkované čáry)



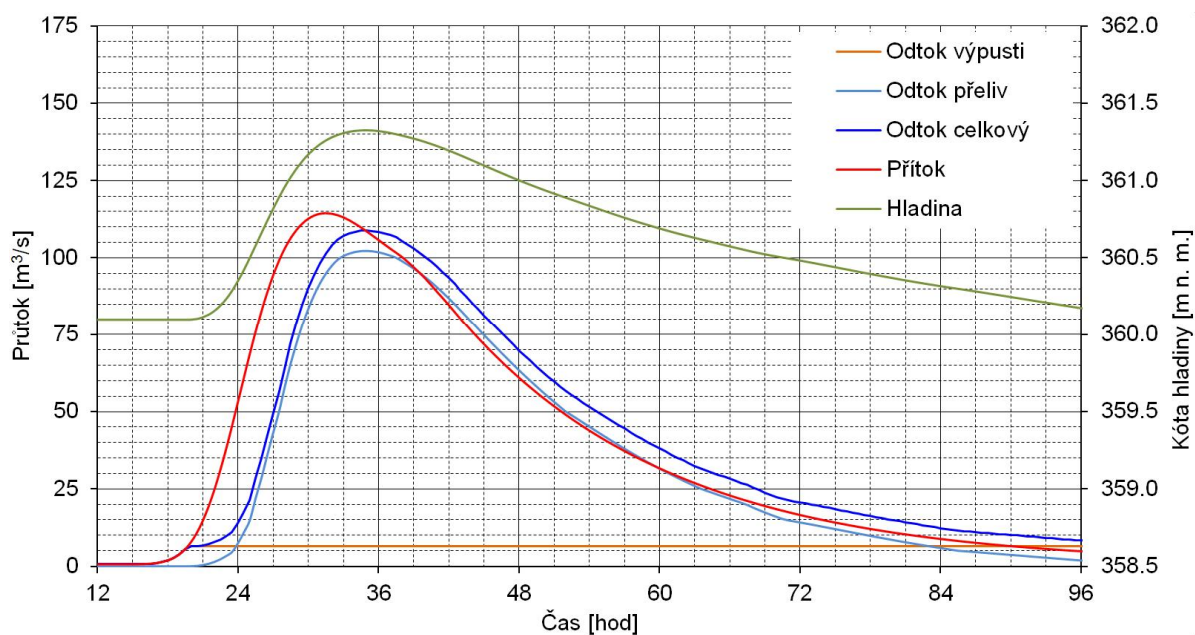
Obr. 16. Transformace PV_{10 000} MOD, var N 3.6.3.



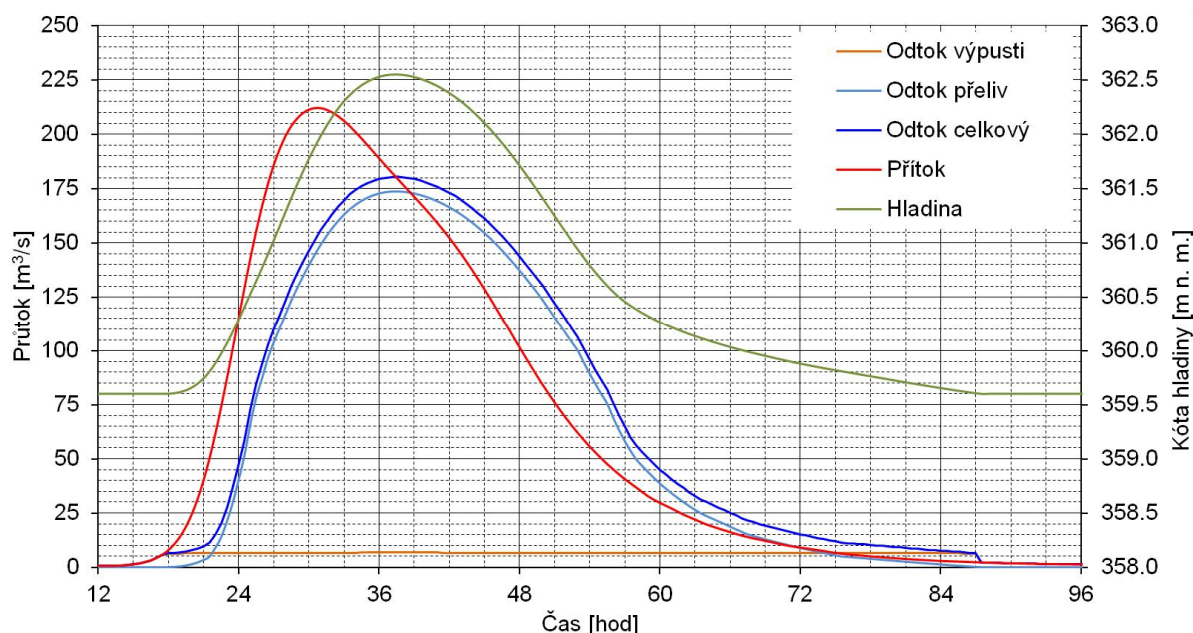
Obr. 17. Transformace PV₁₀₀₀ MOD, var N 3.6.3.



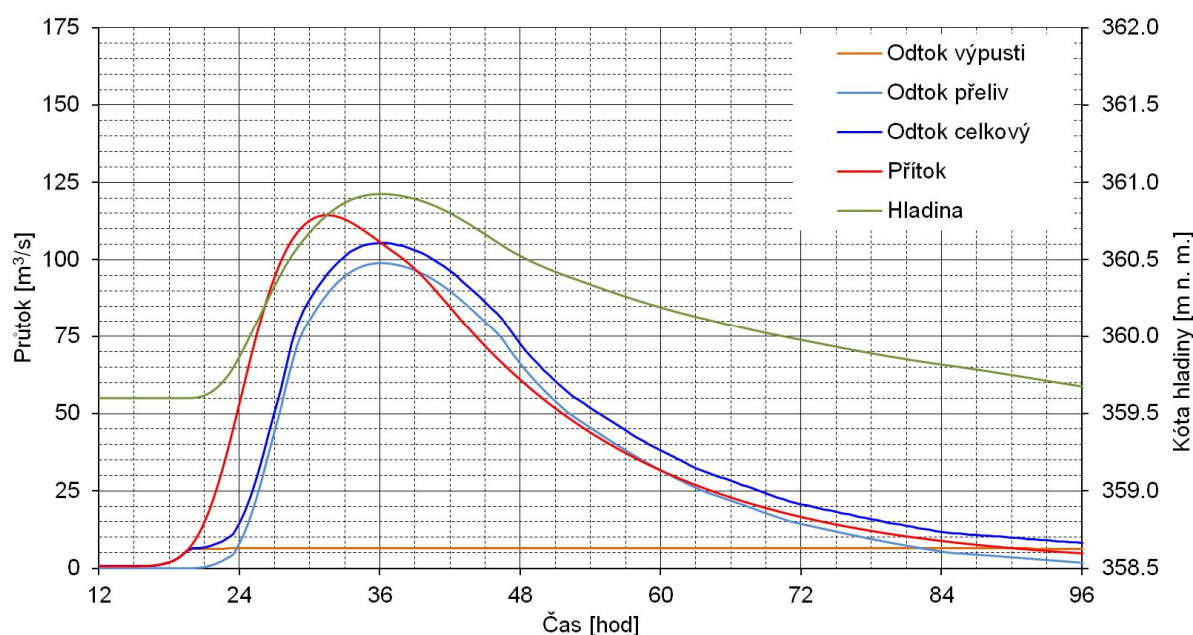
Obr. 18. Transformace PV_{10 000} MOD, var N 3.6.4.



Obr. 19. Transformace PV₁₀₀₀ MOD, var N 3.6.4.



Obr. 20. Transformace PV_{10 000 MOD}, var N 4.6.1.



Obr. 21. Transformace PV_{1000 MOD}, var N 4.6.1.

5.2 Skluz od bezpečnostního přelivu

Průběh hladin ve skluzu byl stanoven pomocí 1D modelu sestaveného ve výpočetním programu HEC-RAS. Podélný profil odpovídá současnému stavu, šířka skluzu byla volena variantně 6,0, 7,0 a 8,0 m. Sklon stěn skluzu byl uvažován 10:1,

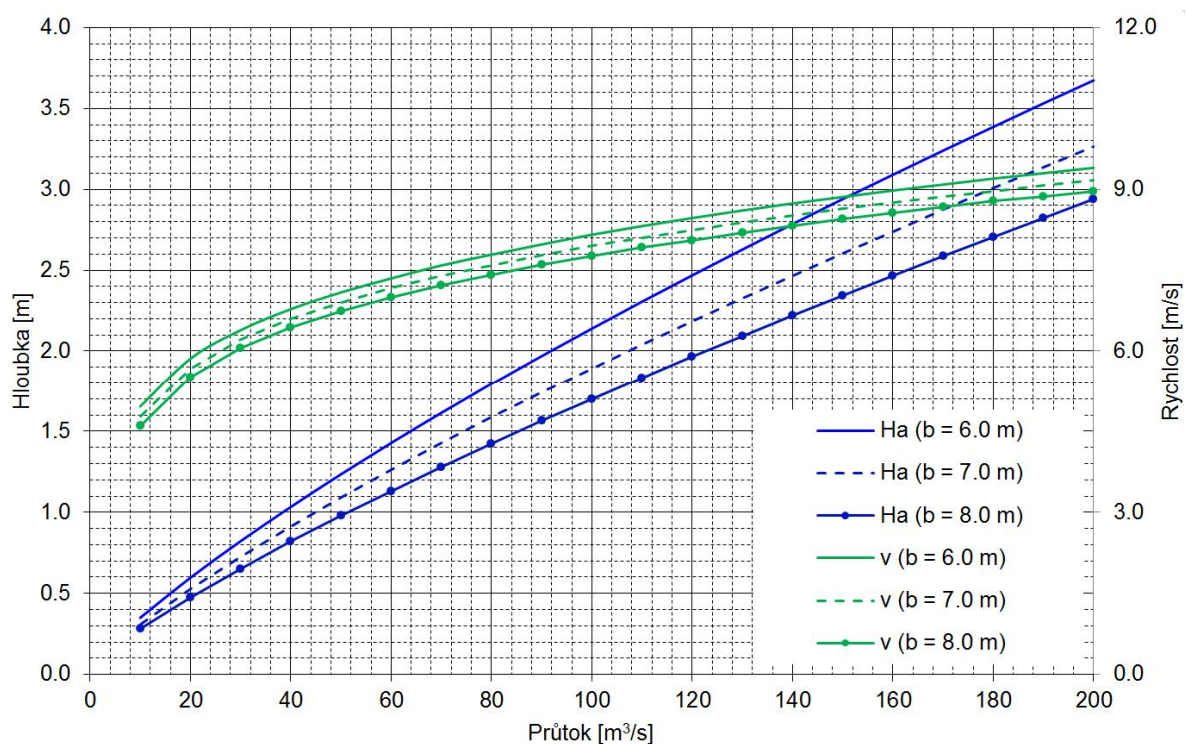
příčné profily byly interpolovány ve vzdálenostech cca 4 m. Hodnota stupně drsnosti betonových stěn a dna skluzu byla uvažována 0,018 (dle Maninga), jako HOP v profilu konce spadiště (km 0,022) byla uvažována kritická hloubka. Pro kalibraci výpočetního modelu byly využity výsledky fyzikálního modelu skluzu od bezpečnostního přelivu VD Šance [30]. Ve výpočtu byl zohledněn vliv provzdušnění dle [30], viz rovnici (07). Na obr. 22a 23 jsou doloženy měrné křivky skluzu ve staničení 0,046 a 0,074.

$$H_a = H \cdot (1 + 0,01 \cdot v) \quad (07)$$

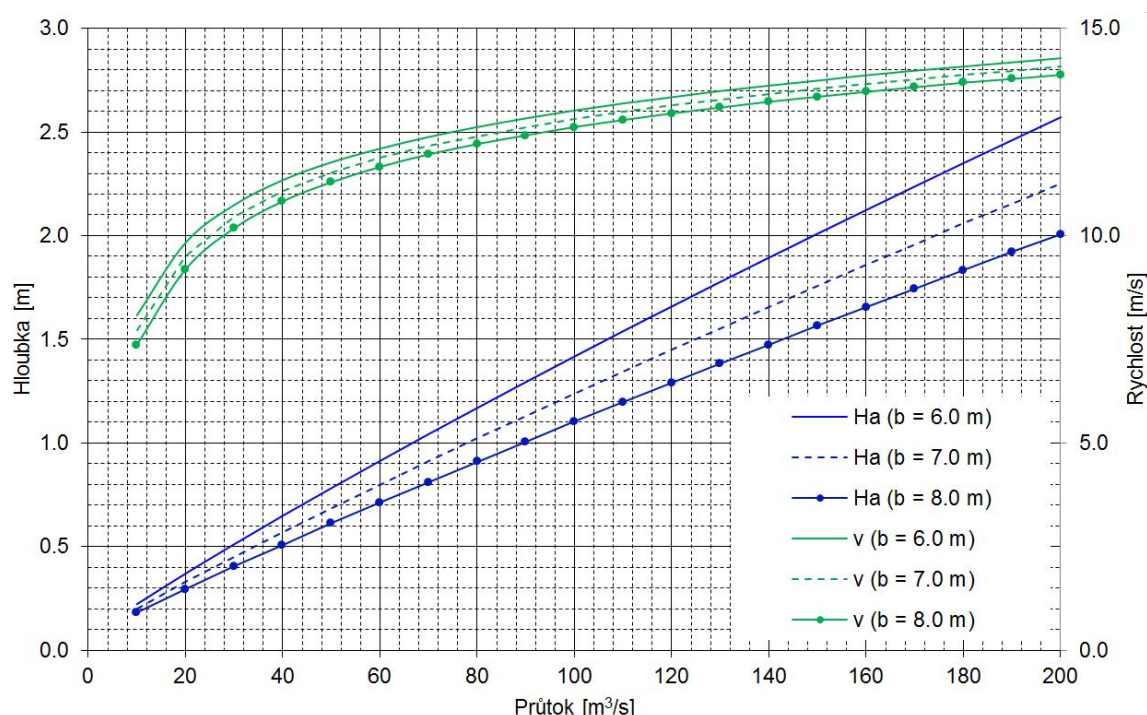
H_a Hloubka provzdušněného proudu [m]

H Hloubka neprovzdušněného proudu [m]

v Rychlost neprovzdušněného proudu [m/s]



Obr. 22. Závislost rychlosti a hloubky provzdušněného proudu na průtoku pro variantní šířky skluzu. Staničení 0,046 (změna podélného sklonu 4,6% na 20,2%).



Obr. 23. Závislost rychlosti a hloubky provzdušněného proudu na průtoku pro variantní šířky skluzu. Staničení 0,074 (změna podélného sklonu 20,2% na 36,5%).

5.3 Vývar pod skluzem od bezpečnostního přelivu

Pro prizmatický vývar obdélníkového příčného profilu a pro divergentní vývar obdélníkového příčného profilu byl proveden návrh potřebných rozměrů vývaru pro variantně volený návrhový průtok. Šířka koncové části skluzu byla předpokládána 8,0 m, stejná šířka byla uvažována pro prizmatický vývar i pro vstupní profil divergentního vývaru.

Pro výpočet prizmatického vývaru byly použity rovnice (08) až (11) uvedené např. v [24]. Při výpočtu divergentního vývaru byl úhel rozšíření uvažován dle rovnice (12), první vzájemná hloubka (h_1) byla stanovena dle rovnice (08), pro tuto hloubku byla pomocí rovnice (13) stanovena hybnost. Druhá vzájemná hloubka (h_2) byla stanovena iteračním postupem tak, aby hybnost pro h_2 odpovídala hybnosti pro h_1 , souběžně se stanovením h_2 byla iteračním postupem stanovena délka vodního skoku dle Nováka, viz rovnici (11).

V tabulkách 05 a 06 jsou uvedeny základní parametry prizmatického a divergentního vývaru pro průtoky 40 až 120 m³/s.

$$h_1 = \frac{Q}{\varphi \cdot b_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (E_1 - h_1)}} \quad (08)$$

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \cdot \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot \beta \cdot Q^2}{g \cdot b_2^2 \cdot h_1^3}} \right] \quad (09)$$

$$\sigma = \frac{h_d + d}{h_2} \quad (10)$$

$$L_{VS} = L_V = K \cdot (h_2 - h_1), K = f\left(\frac{h_2}{h_1}\right) \quad (11)$$

$$TG(\alpha) = \frac{1}{v_1} \quad (12)$$

$$\Phi(h_i) = \frac{\beta \cdot Q^2}{g \cdot A_i} + A_i \cdot z_i \quad (13)$$

Q	Průtok		[m ³ /s]
h_1, h_2	První a druhá vzájemná hloubka vodního skoku		[m]
b_1, b_2	Šířka vývarů profilu h_1 a h_2		[m]
φ	Rychlostní součinitel	0,9	[-]
E_1	Úroveň čáry energie v profilu h_1		[m n. m.]
g	Tíhové zrychlení	9,81	[m/s ²]
β	Boussinesqovo číslo		[-]
σ	Součinitel zatopení		[-]
h_d	Hloubka dolní vody		[m]
d	Zahloubení vývaru		[m]
L_{VS}, L_V	Délka vodního skoku, délka vývaru		[m]
$\Phi(h_1), \Phi(h_2)$	Funkce vodního skoku, hybnost v profilu h_1 a h_2		[m ³]
A_1, A_2	Plocha průtočného profilu v místě h_1 a h_2		[-]
z_1, z_2	Hloubka těžiště průtočného profilu pod hladinou v místě h_1 a h_2		[-]
α	Úhel rozšíření vývaru		[°]
v_1	Rychlost v profilu h_1		[m/s]

Tab. 05. Základní parametry nového prizmatického vývaru s obdélníkovým příčným profilem.

Q	v	h ₁	h ₂	σ	d	h ₁ '	h ₂ '	σ'	L _{vs}
[m ³ /s]	[m/s]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[m]	[-]	[m]
40	14.9	0.36	3.56	0.56	1.92	0.34	3.72	1.05	18.3
60	16.6	0.49	4.59	0.53	2.60	0.45	4.81	1.05	23.5
80	17.6	0.62	5.45	0.52	3.14	0.56	5.74	1.05	27.9
100	18.4	0.74	6.21	0.51	3.69	0.67	6.56	1.04	31.8
120	19.0	0.86	6.89	0.49	4.22	0.78	7.30	1.04	35.2

Tab. 06. Základní parametry nového divergentního vývaru s obdélníkovým příčným profilem.

Q	v	h ₁	h ₂	σ	d	h ₁ '	h ₂ '	σ'	L _{vs}	b
[m ³ /s]	[m/s]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]
40	14.9	0.36	3.30	0.61	1.63	0.34	3.42	1.06	16.6	9.9
60	16.6	0.49	4.22	0.58	2.19	0.46	4.38	1.06	21.2	10.1
80	17.6	0.62	5.00	0.57	2.65	0.57	5.17	1.06	24.8	10.4
100	18.4	0.74	5.63	0.56	3.05	0.68	5.86	1.06	28.0	10.5
120	19.0	0.86	6.22	0.54	3.49	0.79	6.47	1.06	30.7	10.7

Na pracovním jednání 6. 3. 2013 bylo dohodnuto, že návrhovým průtokem vývaru bude maximální odtok přelivem při transformaci PV_{1000 MOD} (cca 100 m³/s), vývar bude navržen jako divergentní.

Na základě doporučení odborné literatury [33] byl proveden odhad parametrů opevnění pod prahem vývaru. Je navržen kamenný zához s velikostí kamene 0,50 m (cca 170 kg), s tloušťkou záhozu 1,10 m na délce 28 m. Parametry opevnění je třeba v návaznosti na výsledky fyzikálního výzkumu upřesnit v navazujícím stupni PD zejména s ohledem na nerovnoměrnost rozdělení rychlostního pole v oblouku za vývarem a na granulometrické charakteristiky materiálu dna (hloubka výmolu, resp. tloušťka opevnění).

6 POSOUZENÍ BEZPEČNOSTI VD V PRŮBĚHU REKONSTRUKCE

Dle posudku bezpečnosti za povodní [1] je stávající MBH 361,55 m n. m. Z výsledků posouzení současného stavu uvedených v tabulce 02 vyplývá, že uvedené MBH přibližně odpovídá PV_{500 MOD}. Lze tedy konstatovat, že nejvyšší přiměřená míra ochrany VD během výstavby je cca PV_{500 MOD}.

Rozhodnutí o úrovni bezpečnosti VD během provádění stavebních prací závisí zejména na těchto faktorech:

- stávající úroveň bezpečnosti;
- technicky dosažitelná maximální míra bezpečnosti po dobu rekonstrukce;
- plán organizace výstavby;
- možnosti odtoku vody z nádrže po dobu rekonstrukce;

- požadavky na plnění zásobní funkce nádrže po dobu rekonstrukce (dočasné snížení zásobní hladiny);
- délka „kritického období“, během kterého by odtok vody přelivem a nebo přelévání vody přes sníženou korunu hráze představovalo zásadní ohrožení bezpečnosti VD.

Je zřejmé, že rozhodnutí o úrovni bezpečnosti během rekonstrukce VD bude možné provést nejdříve během zpracování navazujícího stupně projektové dokumentace, ve které bude podrobněji rozpracováno technické řešení jednotlivých stavebních objektů a plán organizace výstavby (POV). Součástí POV bude v případě potřeby i podrobná specifikace opatření pro zvýšení „dočasné MBH“ v době rekonstrukce (např. jímka před přelivem, nebo zahrazení skluzu v profilu mostu na korunu hráze).

TNV 75 2935 [61] uvádí vztah pro stanovení návrhového průtoku (bez zohlednění objemu PV) pro výstavbu, nebo rekonstrukci VD zařazených do skupiny A, nebo B dle této normy, viz rovnici (14). Takto stanovený návrhový průtok zahrnuje nejen ochranu staveniště (ta je z pohledu předpokládaných prací na VD Letovice druhořadá), ale především míru bezpečnosti VD během provádění stavebních prací. Norma pro variantní délku trvání stavebních prací a N - letost návrhového průtoku řeší tři pravděpodobnosti překročení návrhového průtoku během realizace (5, 10 a 20%).

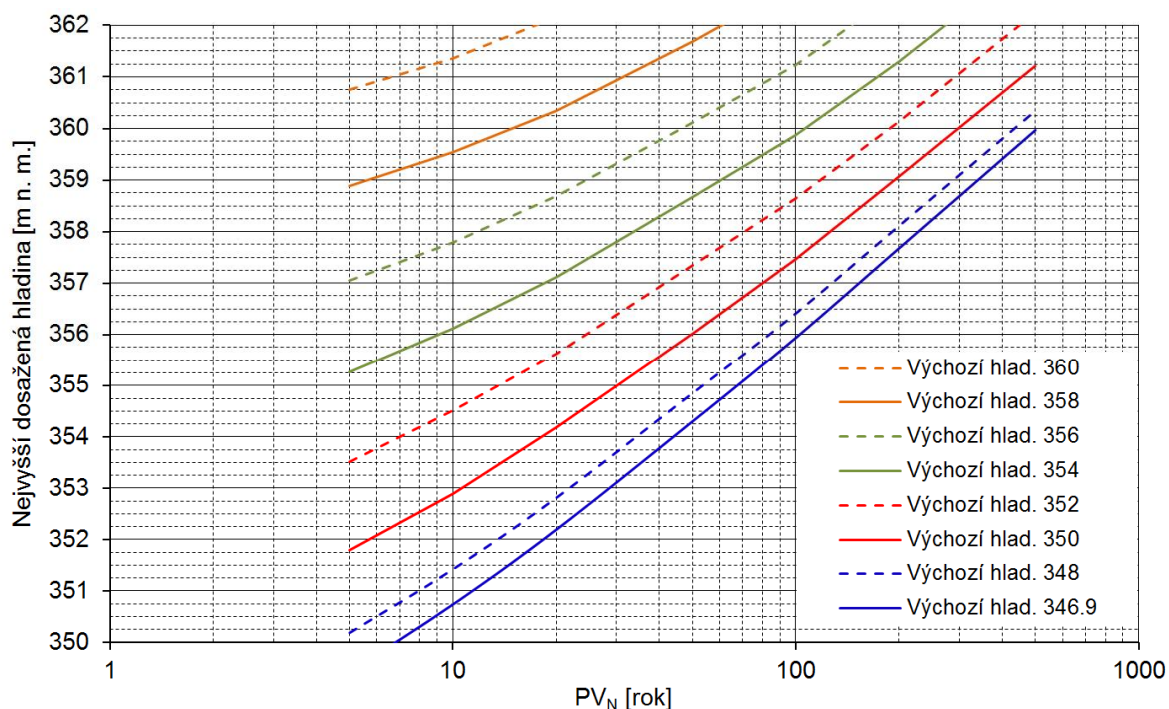
Např. v případě přijetí podstatně bezpečnějšího výchozího předpokladu, tzn. pravděpodobnost výskytu kulminačního průtoku během výstavby <2%, odpovídá předpokládané doby realizace 2 roky návrhový průtok Q_{100} .

$$P_{\frac{T}{N}} = 100 \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{1}{T} \right)^N \right] \quad (14)$$

N	N - letost návrhového průtoku	[rok]
T	Perioda opakování povodňového průtoku	[rok]
$P_{\frac{T}{N}}$	Pravděpodobnosti překročení návrhového průtoku	[%]

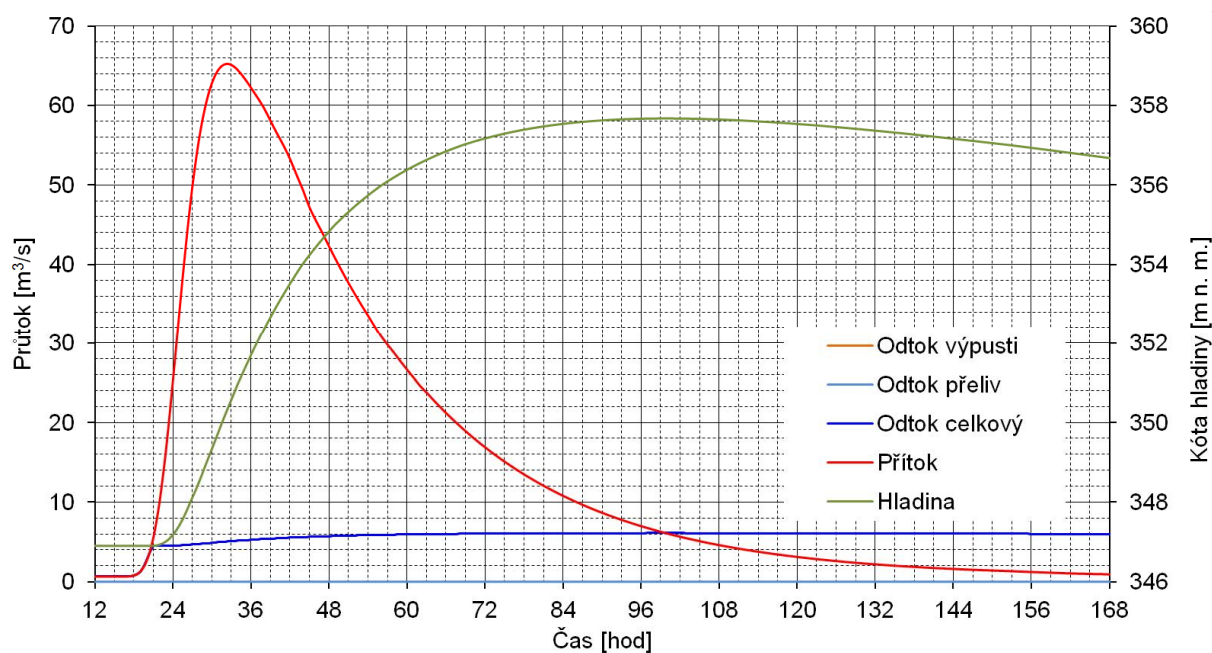
V grafu na obrázku 24 je uvedeno základní shrnutí informací o dosažitelné míře bezpečnosti VD během rekonstrukce. Je zde zobrazena závislost nejvyšší úrovně hladiny v nádrži na úrovni výchozí hladiny (dočasné H_Z) a N - letosti povodně (řešeno pro $PV_{5\text{ MOD}}$ až $PV_{500\text{ MOD}}$). Odtok z nádrže byl uvažován pouze spodními výpustmi, v rámci výpočtů byl přijat předpoklad, že k odtoku přes sníženou korunu hráze, ani přes staveniště přelivu, spadiště a skluzu nedochází.

Pro usnadnění práce s grafem lze jako příklad uvést, že při požadavku na zabezpečení VD na úroveň $PV_{200\text{ MOD}}$ a nepřekročení dočasné MBH na úrovni 361,00 m n. m. by výchozí úroveň hladiny byla cca na kótě 353,50 m n. m. (interpolace mezi plnou zelenou a čárkovanou červenou čarou v grafu).



Obr. 24. Závislost nejvyšší dosažené úrovně hladiny v nádrži na úrovni výchozí hladiny a N - letostí povodně.

Pro ilustraci je v grafu na obrázku 25 doložen průběh transformace PV_{200 MOD} za předpokladu výchozí hladiny na úrovni H_{SN} (346,90 m n. m.).



Obr. 25. Transformace PV_{200 MOD} za předpokladu výchozí hladiny na úrovni H_{SN} (346,90 m n. m.) - ilustrační příklad průběhu transformace PV během rekonstrukce VD.

Na základě předložených výsledků orientačního posouzení možností zajištění bezpečnosti VD během rekonstrukce lze konstatovat, že:

- za předpokladu nepodkročení H_{SN} odpovídá nejvyšší dosažitelná úroveň bezpečnosti VD cca $PV_{500 \text{ MOD}}$;
- dosažitelná úroveň bezpečnosti VD významně překračuje doporučení TNV 75 2935 [61].

V Babicích nad Svitavou
v březnu 2013
Ing. Pavel Golík
golik@golikvh.cz