

Posouzení hydraulických poměrů v prostoru spodních výpustí a navazujícího vývaru VD Vranov - rekonstrukce výpustí



Brno, květen 2017

Akce: VD Vranov – posouzení hydraulických poměrů v potrubí spodních výpustí a vývaru

Objednatel: Povodí Moravy, s.p.

Dřevařská 9312/11

602 00 Brno

tel.: 541 637 111

fax.: 541 211 403

Zhotovitel: Vysoké učení technické v Brně

Fakulta stavební

Ústav vodních staveb

Laboratoř vodohospodářského výzkumu

Veveří 331/95

602 00 Brno

tel.: 54114 7289

fax: 54114 7288

Zahájení a ukončení úkolu: 4/2017 – 5/2017

Odpovědný řešitel: prof. Ing. Jan Šulc, CSc.

Evidenční číslo SoD zhotovitele: HS 127 60 003

Evidenční číslo objednávky objednatele: 977/2017/05109409

Datum: 15. 5. 2017

Razítko:

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	4
1 Základní údaje k vodnímu dílu Vranov.....	5
1.1 Účel vodního díla	5
1.1.1 Akumulace vody.....	5
1.1.2 Ochrana před velkými vodami	5
1.1.3 Další využití vodního díla	5
1.2 Nádrž.....	5
1.3 Přehrada	6
1.3.1 Hráz	6
1.3.2 Spodní výpustí.....	6
1.3.3 Bezpečnostní přeliv	7
1.3.4 Vývar	7
1.3.5 Vodní elektrárna a malá vodní elektrárna 2.....	8
2 Popis a vyhodnocení současného provozního stavu spodních výpustí.....	9
2.1 Shrnutí údajů o kapacitách spodních výpustí uváděných v MŘ	9
2.2 Vyhodnocení kapacity spodních výpustí	10
2.2.1 Výpočet kapacity spodních výpustí.....	10
2.2.2 Stanovení kapacit výpustí z výsledků měření na díle.....	13
2.2.3 Kapacitní bilance stávajících výpustí VD Vranov v porovnání s údaji MŘ.....	14
2.3 Zhodnocení proudových poměrů ve stávajících výpustích.....	16
2.4 Kapacitní požadavek vyplývající z manipulačního řádu VD Vranov.....	18
2.5 Koncové regulační uzávěry kapacitně vhodné pro instalaci na stávající výpustí VD Vranov.....	19
3 Posouzení návrhů rekonstrukce regulačních uzávěrů spodních výpustí.....	22
3.1 Návrh rekonstrukce regulačních uzávěrů VD Vranov předložený ve zprávě [2]	22
3.1.1 Stanovení řešených variant.....	22
3.1.2 Vyhodnocení rozstřikovacího a segmentového uzávěru z hydraulického hlediska	26
3.2 Posouzení kapacity segmentového uzávěru dle návrhu AQUATIS, a.s.	27
3.3 Posouzení nebezpečí vzniku kavitace segmentového uzávěru	28
3.4 Proudění ve vývarovém prostoru	30
4 Doporučení pro případné provedení hydraulických modelových a provozních zkoušek.....	31
4.1 Hydraulický modelový výzkum.....	31
4.2 Provozní zkoušky na díle	32
5 Závěr.....	33
6 Literatura	35

Seznam použitých symbolů a zkratek

Všechny ve zprávě uvedené výškové kóty jsou v systému Balt po vyrovnání, pokud není výslovně v místě textu použit a označen systém Jadran.

a	otevření uzávěru
D	vnitřní průměr
g	gravitační zrychlení
H	odlehlost hladin, spád
h	hloubka proudu
k	součinitel ztráty
L	délka
p	tlak
$p/\rho g$	tlaková výška
Q	průtok
S	plocha
s	otevření uzávěru typu Johnson (historické označení v převzatém materiálu)
v	průřezová rychlost
α	Coriolisovo kritérium
ρ	hustota kapaliny
λ	součinitel ztráty třením
ζ	součinitel ztráty místní
μ	výtokový součinitel
σ	kavitační součinitel
ε	součinitel kontrakce

Zkratky

Bpv	Balt po vyrovnání (výškový systém)
DN	jmenovitý vnitřní průměr potrubí
MŘ	manipulační řád
M _{ro}	maximální úroveň hladiny retenčního prostoru ovladatelného
M _{rn}	maximální úroveň hladiny retenčního prostoru ovladatelného
M _z	maximální úroveň hladiny zásobního prostoru
SV	spodní výpusť
VD	vodní dílo
VVN	velmi vysoké napětí

Indexy

atm	atmosférický
b	brutto
k	vztahující se ke konfuzoru, vztahující se k úplnému otevření
k	kavitační
kr	kritická (kavitace)
Johnson	vztahující se k uzávěru typu Johnson
u	vztahující se k uzávěru
vstup	vztahující se ke vstupnímu průřezu
výstup	vztahující se k výstupnímu průřezu
w	stav nasycené páry
z	ztráta (mechanické energie)
tření	způsobený třením
válec	vztahující se k válcovému uzávěru
vtok	vztahující se ke vtoku

1 Základní údaje k vodnímu dílu Vranov

V celém textu zprávy jsou uváděny údaje v systému Balt po vyrovnání (Bpv), pokud není v textu výslovně uveden systém Jadran.

Z Manipulačního řádu (MŘ) VD Vranov [1] jsou použity údaje o hlavních technických parametrech vodního díla.

1.1 Účel vodního díla

1.1.1 Akumulace vody

Akumulace vody pro:

- zajištění trvalého minimálního průtoku v toku pod jezem ve Vranově v množství $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
- nalepšení průtoků pro zajištění trvalého minimálního průtoku v Dyji v bilančním profilu jezu Krhovice v množství $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
- odběr pro skupinový vodovod Znojmo,
- odběr pro skupinový vodovod Vranov - Moravské Budějovice - Dukovany,
- zajištění průtoků v Dyjsko- mlýnském náhonu od Krhovického jezu,
- výrobu elektrické energie,
- odběry pro závlahy,
- odběry drobných odběratelů povrchové vody.

1.1.2 Ochrana před velkými vodami

Snížení kulminací velkých vod s částečnou ochranou pozemků pod přehradou až po nádrže Nové Mlýny.

1.1.3 Další využití vodního díla

Další využití vodního díla pro:

- rekreaci a vodní sporty,
- sportovní rybolov,
- plavba v nádrži.

1.2 Nádrž

Údaje o technických a hydrologických parametrech díla jsou převzaty ze zprávy [2].

Délka vzduť nádrže při maximální hladině je 29,8 km. Objemy jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1 Základní charakteristiky nádrže VD Vranov

Prostor	min. hladina (dno)	max. hladina	plocha	objem
-	[m n. m.]	[m n. m.]	[ha]	[mil. m ³]
stálé nadržení	306,75	331,45	295,0	31,840
zásobní	331,45	348,45	558,8	79,668
retenční ovladatelný	348,45	350,10	610,0	11,157
retenční neovladatelný	350,10	351,45	761,3	10,031
Celkový	306,75	351,45	761,3	132,696

1.3 Přehrada

1.3.1 Hráz

Typ hráze - betonová gravitační hráz z litého betonu s osou v oblouku o poloměru 500 m.

Celkem je přehradní zeď rozdělena na 19 bloků. Šířka jednotlivých bloků hráze je $13,5 \text{ m} \div 15,5 \text{ m}$, elektrárenský dvojblok je šířky 27 m.

Skalní podklad pod základovou spárou tvoří rula, amfibolit a svor. Na návodní straně hráze je injekční clona a celá plocha základové spáry byla proinjektována vrty $10 \text{ m} \div 20 \text{ m}$ hlubokými ve vzdálenosti 8,0 m.

Technické parametry hráze:

- Kóta koruny hráze 353,39 m n. m.
- Kóta dna před hrází 306,39 m n. m.
- Nejnižší kóta základu 293,53 m n. m.
- Délka koruny hráze 290,45 m
- Šířka vozovky na koruně hráze 7,0 m
- Šířka hráze v základech 42,2 m
- Výška hráze (od základu) 59,87 m
- Výška hráze nade dnem údolí 47,00 m
- Poloměr zakřivení hráze 500 m
- Kóta koruny přepadu 350,10 m n. m.
- Kóta dna vývaru 301,96 m n. m.
- Kóta osy spodních výpustí 307,45 m n. m.
- Kubatura hráze $200\,728 \text{ m}^3$
- Sklon návodního líce hráze 1 : 0,048
- Sklon vzdušného líce hráze 1 : 0,738

1.3.2 Spodní výpusti

Spodní výpusti (SV) jsou umístěny v levé části přehradního tělesa a tvoří je 4 potrubí DN 1600 s osou na kótě 307,45 m n. m.

Tab. 2 Technické parametry spodních výpustí:

Kapacita výpustí	2 uzávěry Johnson (94 % otevření **)	2 válcové uzávěry (100 % otevření)
a) při max. hladině 351,45 m n. m.	$2 \times 35,1 = 70,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} *$	$2 \times 36,4 = 72,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} *$
b) při hladině v úrovni přelivu 350,10 m n. m.	$2 \times 41,5 = 83,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$2 \times 43,8 = 87,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
c) při max. zásobní hladině 348,45 m n. m.	$2 \times 40,7 = 81,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$2 \times 42,95 = 85,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
d) při min. zásobní hladině 331,45 m n. m.	$2 \times 31,5 = 63,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$2 \times 31,9 = 63,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

* Při hladinách nad úroveň přelivu a dochází s nárůstem průtoků k ovlivnění odtoku vysokou úrovní spodní vody.

** V případě Johnsonova uzávěru jsou nejlepší průtokové poměry při otevření na 94 %. Při vyšším otevření dochází ke změně charakteru proudění, způsobené odtržením vodního proudu od vnitřního pláště uzávěru. Dochází tím k provzdušnění vodního proudu a ke snížení průtočného profilu. Při 100 % otevření se kapacita sníží o $(5 \div 7) \%$.

1.3.3 Bezpečnostní přeliv

Volný (nehrazený) bezpečnostní přeliv je umístěn v levé části přehradní zdi. Tvoří jej devět přepadových polí každé o světlosti 13,6 m. Šest přepadových polí přiléhá ke břehu a z nich pod pěti krajními poli jsou zřízeny v levém břehu kaskády, jedno pole přiléhající k bloku spodních výpustí tlumí přepadající vodu přímo ve vývaru. Mezi dvěma bloky spodních výpustí a dvěma elektrárenskými bloky jsou další tři pole bezpečnostního přelivu. Pod těmito třemi přepadovými poli je přepadající voda tlumena přímo ve vývaru.

Technické parametry přelivu:

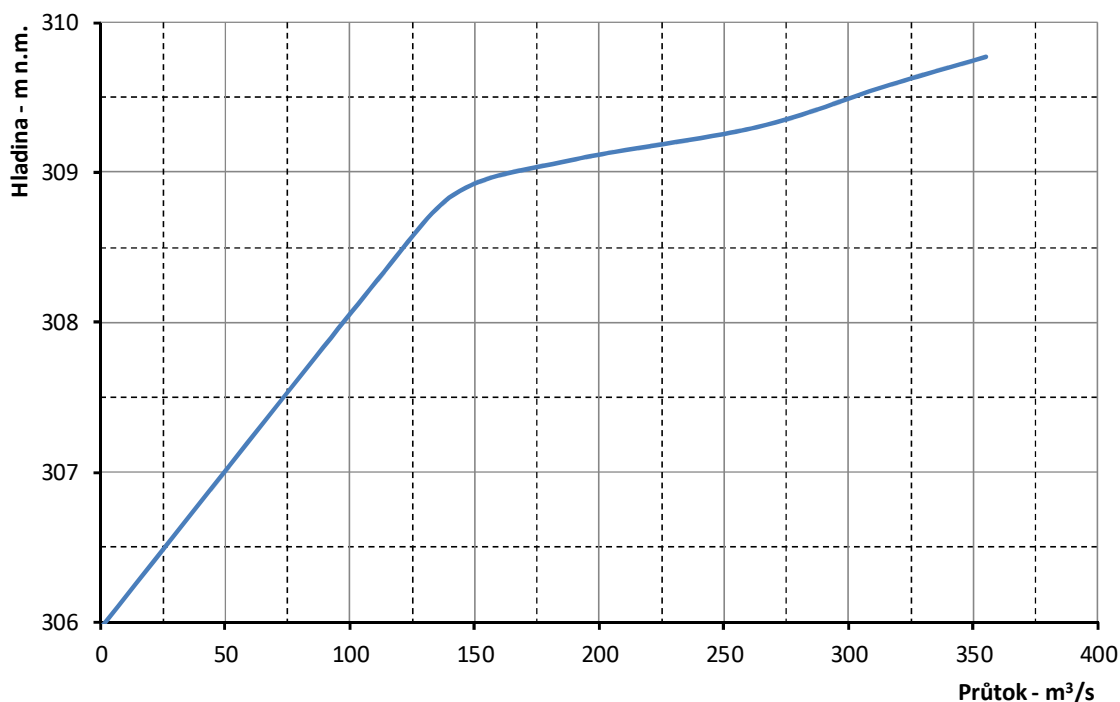
• Kóta pevné přepadové hrany přelivu	350,10 m n. m.
• Přepadové otvory světlosti	9 x 13,6 m
• Délka přepadové hrany celkem	122,4 m
• Přepadová výška při max. hladině 351,45 m n. m.	1,35 m
• Kapacita přelivu při maximální hladině 351,45 m n. m.	460 m ³ .s ⁻¹
• Max. výška po spodní hranu mostu	2,0 m
• Kapacita přelivu při hladině na spodní hraně mostního profilu	820 m ³ .s ⁻¹

1.3.4 Vývar

Pod přelivy a spodními výpustmi je vývar nepravidelného tvaru, průměrné délky 58,10 m a šířky ve dně 40,60 m. Pro utlumení energie paprsku vody ze spodních výpustí jsou ve vývařišti dva betonové rozrážeče výšky 4,50 m. Dno i boční stěny vývaru jsou provedeny z betonu. Za betonovým prahem vývaru je proveden kamenný zához.

• Kóta dna vývaru	301,96 m n. m.
• Kóta závěrečného prahu vývaru	305,96 m n. m.
• Hloubka vývaru pod prahem	4,00 m

Měrná křivka (závislost úrovně hladiny na průtoku) pro profil závěrečného prahu vývaru byla poskytnuta Vodohospodářským dispečinkem Povodí Moravy, s.p. Charakteristika je uvedena na obr. 1.



Obr. 1 Měrná křivka na závěrném prahu vývaru v systému Bpv.
(sestavená z vypočtených průběhů hladiny od jezu Formosa)

1.3.5 Vodní elektrárna a malá vodní elektrárna 2

Vodní elektrárna (VE)

Počet turbín	3
Typ turbín	Francis
Instalovaný výkon	18,9 MW
Přívodní potrubí	Ø 2,6 m
Hrazení na vtoku do potrubí	ocelová tabule
Provozní hrazení na návodní straně	klapkový uzávěr
Hrazení na vzdušní straně	kulový uzávěr
Hltnost turbíny - průtočná kapacita	3 x 15 m³.s ⁻¹
Max. hltnost	45 m³.s ⁻¹

Malá vodní elektrárna 2 (MVE 2) (ve vývaru od bezpečnostního přelivu nalevo od stávající VE)

Počet turbín	1
Typ turbín	Francis
Instalovaný výkon	1,125 MW
Přívodní potrubí	směrem k turbíně DN 600, DN 700 a DN 1000
Uzávěr na vtoku na turbínu	klapkový uzávěr DN 800
Hrazení na vzdušní straně	kulový uzávěr
Hltnost turbíny - jmenovitá	2,4 m³.s ⁻¹
Max. hltnost	3,5 m³.s ⁻¹

2 Popis a vyhodnocení současného provozního stavu spodních výpustí

2.1 Shrnutí údajů o kapacitách spodních výpustí uváděných v MŘ

V této kapitole 2.1 jsou uvedeny údaje převzaté ze zprávy [2].

VD Vranov bylo v roce 1934 uvedeno do provozu za účelem protipovodňové ochrany, výroby elektrické energie, rekreace, sportovního rybářství a plavby. Ve strojovně spodních výpustí v patě hráze VD jsou umístěny čtyři spodní výpusti o průměru 1600 mm. Každá výpust je osazena vtokovým stavidlovým uzávěrem na návodní straně s ovládáním v horní strojovně a dále šoupátkem jako revizním uzávěrem a provozním regulačním uzávěrem umístěným v dolní strojovně. Kapacity výpustí podle textové části MŘ [1] jsou uvedeny v tab. 3.

Tab. 3 Kapacity SV dle textové části MŘ

	Uzávěry	Johnson 94 %	Válec 100 %	Celkem
		[m ³ .s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]
při M _z =	348,45 m n. m.	2 x 40,7	2 x 42,95	167,3
při M _{ro} =	350,10 m n. m.	2 x 41,5	2 x 43,80	170,6
při M _m =	351,45 m n. m.	2 x 35,1	2 x 36,40	143,0

Provozní uzávěr na výpusti č. 1 a č. 2 je Johnsonův a na výpusti č. 3 a č. 4 je uzávěr válcový. Johnsonovy uzávěry byly na vodní dílo dodány a instalovány v roce 1932 firmou Škodovy závody. Válcové uzávěry byly dodány a instalovány v témže roce firmou Vítkovické horní a hutní těžárstvo.

V přílohách MŘ [1] jsou ovšem uvedeny poněkud jiné údaje o kapacitě SV, a to rozdílně v tabulkovém a grafickém vyjádření. V tabulkové části jsou kapacity následující, viz tab. 4.

Tab. 4 - Kapacity SV dle tabulkové části MŘ

	Uzávěry	Johnson	Válec	Celkem
		[m ³ .s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]	[m ³ .s ⁻¹]
při M _z =	348,45 m n. m.	2 x 40,7	2 x 40,5	162,4
při M _{ro} =	350,10 m n. m.	2 x 41,5	2 x 41,3	165,6
při M _m =	351,45 m n. m.	2 x 42,2	2 x 42,0	168,4

Ve zprávě [2] je uveden názor, s nímž se naprosto shodují, že mezi kapacitami výpustí s odlišnými uzávěry musejí být výraznější rozdíly. Správnost tohoto názoru je z mé strany potvrzena dvojím přístupem v kapitole 2.2.

V MŘ pod tabulkou (tab. 20) je uvedena poznámka, že při hladině 353,45 m n. m. (odtok přelivem 980 m³.s⁻¹) dochází k poklesu kapacity Johnsonových uzávěrů na 36,5 m³.s⁻¹ v důsledku vzestupu hladiny ve vývaru. U válcových uzávěrů takový údaj uveden není, ale lze předpokládat, že to bude platit analogicky také. Není ovšem uvedeno, jaký průtok je současně převáděn ostatními výpustmi, takže tento údaj je poněkud vágní.

Na první pohled je vidět, že tato informace je v tab. 3 špatně interpretována a redukce kapacity je aplikována při hladině o 2 m nižší - 351,45 m n. m. Tento údaj je tedy možné považovat za chybný.

Dále je patrné, že kapacita válcových uzávěrů v tab. 4 je asi o $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ menší než v tab. 3 a je tak srovnatelně velká jako kapacita Johnsonových uzávěrů. Přitom z principu použitých koncových uzávěrů vyplývá, že uzávěry typu Johnson by měly vykazovat menší kapacitu.

V grafických přílohách MŘ [1] jsou uvedeny odlišné kapacity SV s tím, že byly získány s pomocí hydrometrického měření v r. 1979 při hladině v nádrži 348,87 m n. m. (výškový systém Jadran).

Tab. 5 - Kapacity SV dle grafické části MŘ

	Uzávěry	Johnson 94 %	Válec 100 %	Celkem
		[$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	[$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	[$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
při $M_z =$	348,45 m n. m.	2 x 43,3	2 x 45,6	177,8
při $M_{ro} =$	350,10 m n. m.	2 x 44,0	2 x 46,2	180,4
Při $M_m =$	351,45 m n. m.	2 x 45,4	2 x 47,6	186,0

Jak uvádí zpráva [2], je zde rozdíl mezi kapacitou obou typů uzávěrů na „správné“ straně, ale i tak údaje vzbuzují určité pochybnosti o jejich korektnosti, protože poněkud odporují standardní představě založené na zákonitostech hydrauliky. Zarážející je jen malý rozdíl mezi kapacitou výpustí s válcovým a Johnsonovým uzávěrem. Vzhledem k odlišnému charakteru různých koncových uzávěrů by bylo možné očekávat daleko větší rozdíl v jejich kapacitě, což potvrzuje i zjištění uvedené v kapitole 2.2. V tabulce uvedený rozdíl je však jen $4 \% \div 5 \%$. Přitom podle informace provozovatele VD byly tyto kapacity stanoveny na základě vyhodnocení velikosti průtoku v kalibrovaném limnigrafickém profilu pod přehradou.

2.2 Vyhodnocení kapacity spodních výpustí

K vyhodnocení kapacity je možno ještě využít dalších dvou přístupů, kterými je možné doplnit i potvrdit názor uvedený ve studii [2]. Jedná se o klasický přístup výpočtový (1D) a použití údajů uváděných Kratochvilem [3] z velmi cenného provedeného měření „in situ“.

Veškeré výpočty, jak teoretické, tak využívající změřené a následně zpracované charakteristiky, jsou archivovány na pracovišti zpracovatele posudku. Zde v textu jsou uváděny pouze výsledky výpočtů.

Ve výpočtové bilanci je uvažována zcela vysunutá návodní hradicí tabule, tedy neomezuující průtočný průřez vtoku.

2.2.1 Výpočet kapacity spodních výpustí

2.2.1.1 Kapacita výpusti s válcovým regulačním uzávěrem

Ztrátová výška mechanické energie je po přičtení rychlostní výšky na výstupu z výpusti v bilanci rovnoměrného ustáleného proudění shodná s odlehlostí hladin případně s odlehlostí úrovní hladiny v horní nádrži a osy výpusti ve výstupním profilu (v případech obou posuzovaných výpustí se jedná o úroveň 307,45 m n. m.).

Při maximální úrovni hladiny zásobního prostoru činí spád brutto 41 m (jedná se o výtok neovlivněný úrovní hladiny v dolní zdrži). Počátek ovlivňování je zvolen v našem případě překročením úrovně osy výpusti hydrostatickou hladinou ve vývarovém prostoru, určenou

Q/h charakteristikou profilu. Závislost úrovně hladiny na průtoku v profilu vývarového prahu byla převzata ze zprávy [2], ta je sestavená z vypočtených průběhů hladiny od jezu Formosa a byla poskytnuta Vodohospodářským dispečinkem Povodí Moravy, s. p.

Při proudění spodní výpustí vybavené válcovým regulačním uzávěrem lze předpokládat po celé její délce plný průtočný průřez, pohyblivé regulační prvky uzávěrů i jejich těles (ani regulačního ani revizního) nezasahují v případě úplného otevření do proudu.

V daném případě na výpusti osově délky 51 m zakončené válcovým uzávěrem vznikají při proudění pouze ztráty mechanické energie na česlích, vtoku a ztráty od účinku tření (po délce). Ztráty v česlích při poměrně velkoryse dimenzované ploše je možno zanedbat, při přepočtu na maximální očekávatelný průtok výpustí činí ztrátová výška 2 cm. Hodnoty ztrátových výšek v profilech česlí zanedbávali i autoři zdrojů [3, 4] při teoretické bilanci proudění, tak i při vyhodnocení měření hydraulických charakteristik na konkrétních výpustích.

Vtokový díl je tvořen kónusem. Z přílohy MŘ [1] byl změřen úhel konfuzornosti vtokového dílu. Pro tento úhel lze uvažovat níže uvedené rozmezí hodnot součinitelů místní ztráty mechanické energie.

Při bilanci bylo předpokládáno s hodnotou Coriolisova kritéria ve výstupním profilu z výpusti s válcovým uzávěrem $\alpha = 1,03$.

Pro výpočtovou bilanci jsou použity následující hydraulické charakteristiky:

- celkový spád brutto (odlehlost hladiny horní a osy výpusti při neovlivnění) 41 m,
- průměr výpusti 1,6 m,
- délka výpusti 51 m,
- součinitel místní ztráty mechanické energie na konfuzorovém vtoku $\zeta_k = (0,14 \div 0,16)$,
- součinitel ztráty třením (po délce) $\lambda = (0,12 \div 0,18)$.

Pro uvedený spád (při úrovni hladiny v nádrži 348,45 m n. m.) vycházejí pro spodní výpust VD Vranov se zcela otevřeným revizním a koncovým regulačním válcovým uzávěrem následující hodnoty průtoků $Q = (45,8 \div 42,9) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a průřezových rychlostí $v = (22,8 \div 21,4) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

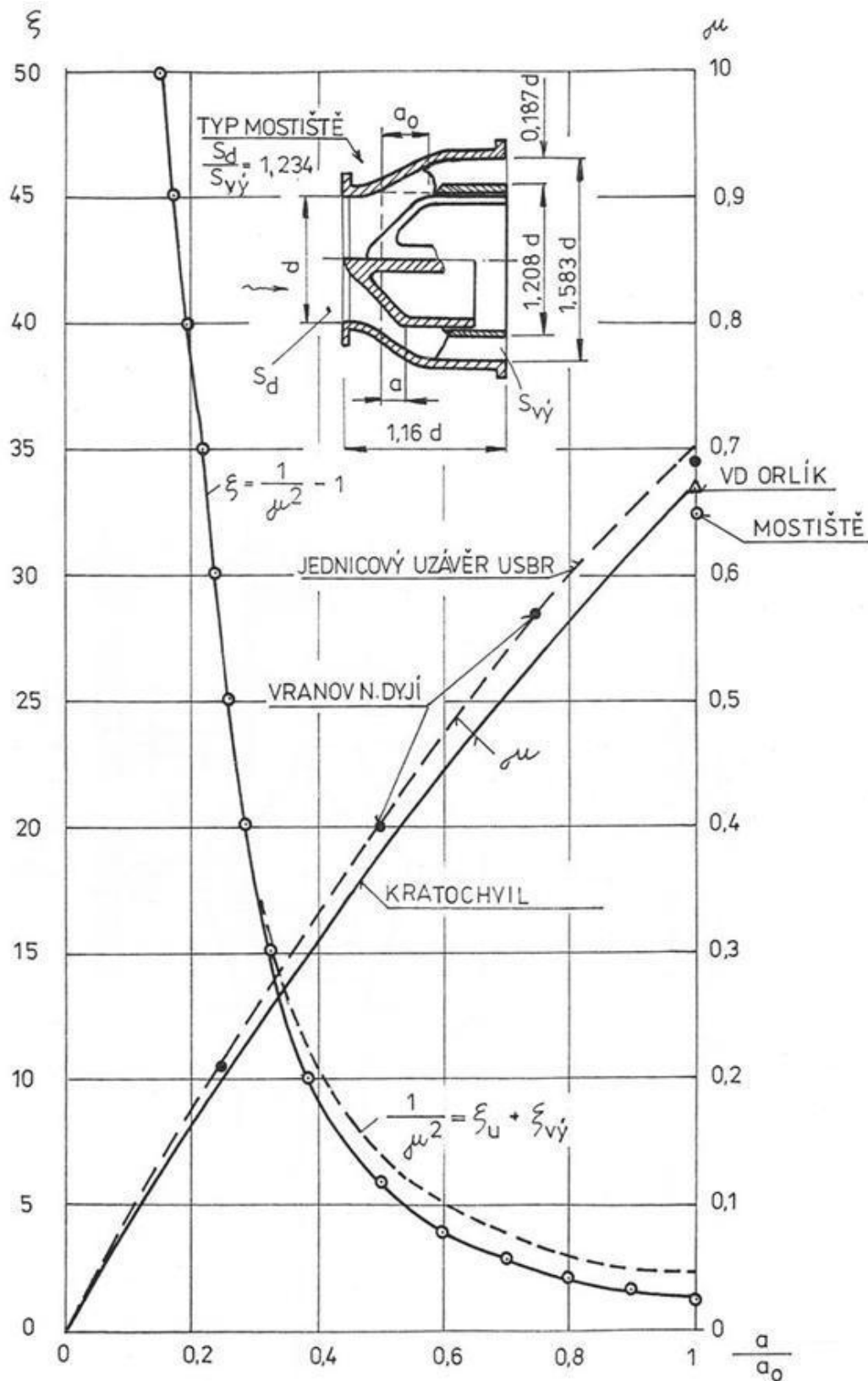
2.2.1.2 Kapacita výpusti s regulačním uzávěrem typu Johnson

V protékané výpusti budou realizovány ztráty mechanické energie při konkrétním průtoku v porovnání s předchozí uvedenou výpustí zvětšené o ztrátu v koncovém regulačním uzávěru. Jedná se o místní ztrátu způsobenou změnou průtočného průřezu. Pouze poznamenejme, že do energetické bilance je nutno připočítat kinetickou energii výstupního proudu vytékajícího z uzávěru.

V našem posuzovaném případě (plné otevření uzávěru) se jedná o poproudění zmenšení průtočného průřezu z plochy kruhové o průměru $D = 1,6 \text{ m}$, $S_{\text{vstup}} = 2,01 \text{ m}^2$ do plochy mezikruží $S_{\text{výstup}} = 1,85 \text{ m}^2$, stupeň zúžení (konfuze) $n = 1,086$. Hodnotu součinitele místní celkové ztráty prstencového uzávěru lze převzít z tabulkových údajů uvedených ve zprávě [5] přímo pro uzávěr VD Vranov $\zeta = 2,04$ při úplném otevření. Pozor, jedná se však o **hodnotu součinitele celkové ztráty mechanické energie, tedy včetně ztráty výtokové i dalších ztrát realizovaných na výpusti prouděním**. Uvedená hodnota (kumulovaného) součinitele ztráty pro VD Vranov je vztažena ke spádu brutto!

Pro úplnost je na obr. 2 předložen průběh výtokových i ztrátových součinitelů uzávěrů typu Johnson.

Pro zvolený spád (při úrovni hladiny v nádrži 348,45 m n. m.) vycházejí pro výpusť VD Vranov s koncovým úplně otevřeným uzávěrem typu Johnson následující hodnoty průtoků $Q = (39,9 \div 38,0) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a průřezových rychlostí $v = (19,9 \div 18,9) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 2 Součinitelé ztrát a výtokoví součinitelé uzávěrů typu Johnson [5]

2.2.2 Stanovení kapacit výpustí z výsledků měření na díle

Díky měření realizovanému v roce 1935 na VD Vranov [3] při odlehlosti hladiny od osy uzávěru (brutto spádu) 24,2 m byly získány cenné výsledky pro přímé posouzení kapacit obou typů výpustí. Výpust vybavená koncovým regulačním válcovým uzávěrem je z hydraulického hlediska výpustí s konstantním průtočným průřezem po délce, což umožňovalo stanovit z výsledků měření hydrometrovaného průtoku v poproudě pod dílem situovaném měrném profilu hodnotu celkového ztrátového součinitele (ztráty třením i ztráty místní na vtoku do výpusti).

Za předpokladu úplně otevřených uzávěrů na dané výpusti se proudění realizuje v pásmu kvadratického odporu, to umožňuje realizovat bez problému přepočty průtokových kapacit i na vyšší spády odlišné od spádu v době provádění měření na díle. Výsledky měření jsou shrnuty v článku [3] a částečně i zprávě [5].

2.2.2.1 Změřená a následně přepočtená kapacita výpusti s válcovým regulačním uzávěrem

Při spádu na výpusti $H = H_b = 24,2$ m, tj. cca úroveň hladiny stálého nadržení (331,45 m n. m.) byl potvrzen hydrometrovací metodou průtok na výpusti zakončené válcovým uzávěrem $Q = 35,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Při využití Bernoulliho bilance pro ustálené proudění výpustí platí rovnost celkové ztrátové výšky (včetně ztráty výtokové) a spádu brutto, což lze interpretovat vztahem:

$$2 \cdot g \cdot H = (1 + \zeta_{\text{vtok}} + \zeta_{\text{tření}}) \cdot v^2 = k_{\text{válec}} \cdot v^2 \quad (1)$$

Zde celkovou ztrátovou výšku lze vyjádřit násobkem kumulovaného součinitele k a kvadrátu vztahné průřezové rychlosti v . Pro výpust s válcovým uzávěrem označme součinitele $k_{\text{válec}}$.

Při výše uvedeném hydrometrovaném průtoku činí průřezová rychlost v potrubí $v = 17,61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, rychlostní výška 15,8 m. V bilanci předpokládáme hodnotu Coriolisova kritéria $\alpha = 1,00$ a to i na výtoku z válcového uzávěru. Výsledná kumulovaná konstanta $k_{\text{válec}} = 1,532$. Tisíciny zde mají ryze orientační doprovodný charakter, relativní nejistotu těchto hodnot lze očekávat cca 5 %.

Zde je zvolen za vztahný profil průřez výpusti $D = 1,6$ m.

Při transformaci bilance na spád 41 m vycházejí pro výpust následující hydraulické charakteristiky: $v = 22,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $Q = 46,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Tento výsledek je pro další navrhování a posuzování úprav výpustí velmi cenný, ztrátové charakteristiky výpusti (bez koncového uzávěru na ní) lze dále spolehlivě využívat pro výpočty, kdy se proudění realizuje v pásmu kvadratického odporu (automodelové oblasti).

2.2.2.2 Změřená a následně přepočtená kapacita výpusti s regulačním uzávěrem typu Johnson

Při spádu na výpusti $H = H_b = 24,2$ m byl potvrzen hydrometrovací metodou průtok na výpusti zakončené uzávěrem Johnson $30,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Zcela obdobným způsobem použitým pro případ výpusti s válcovým uzávěrem je možné uvést energetickou bilanci na výpusti zakončené prstencovým uzávěrem, uvedená rovnice je rozšířena o hodnotu součinitele ztráty v koncovém uzávěru. Vzhledem ke skutečnosti, že lze těžko určit hodnotu Coriolisova kritéria výstupního proudu (v příčném průřezu charakteru prstence – mezikruží), je výhodné definovat a využívat součinitele celkové ztráty na uzávěru, zahrnujícího již ztrátu výtokovou (kinetickou energii výtokového paprsku). Bilance má tvar:

$$2 \cdot g \cdot H = (\zeta_{\text{vtok}} + \zeta_{\text{tření}} + \zeta_{\text{výtok}}) \cdot v^2 = k_{\text{Johnson}} \cdot v^2 \quad (2)$$

Při výše uvedeném průtoku stanoveném při měření na díle činí průřezová rychlost v potrubí $v = 15,1 \text{ m.s}^{-1}$, výsledná kumulovaná konstanta pro celou výpust $k_{\text{Johnson}} = 2,081$.

Při transformaci balance na spád 41 m vycházejí pro výpust následující hydraulické charakteristiky: $v = 19,7 \text{ m.s}^{-1}$, $Q = 39,52 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Na tomto místě je nutné uvést zjištění popisované ve zprávě [5].

„Před úplným otevřením vzniká změna charakteru proudění, která je způsobena odtržením vodního proudu od vnitřního pláště uzávěru. Vzniká tak skok v průtoku, který se sníží následkem zmenšení průtočného průřezu a při dalším otevírání se již nezvyšuje. Hodnota zdvihu s , při kterém se začíná vodní proud odtrhovat od vnitřního pláště uzávěru, se určí z rovnice

$$\frac{s}{s_k} = \frac{1}{\sqrt{1+5,7\lambda}} \quad (3)$$

Pro součinitel tření $\lambda = 0,01$ je

$$\frac{s}{s_k} = 0,97, \quad (4)$$

pro $\lambda = 0,03$ je

$$\frac{s}{s_k} = 0,93, \quad (5)$$

To znamená, že se vodní proud začne odtrhovat od vnitřního pláště uzávěru při poměrném otevření uzávěru mezi 93 až 97 %.

Dále jsme zjistili z měření průtoku výpustního potrubí s jehlovým uzávěrem, že se zavzdušením sníží jeho kapacita o 5 až 7 %.

Pro úplné otevření je použit symbol s_k . Odtrhávání a snižování kapacity vedlo dle provozních zkušeností z počátků éry používání uzávěrů tohoto typu k následnému vývoji vhodnějších protékavých vnitřních povrchů [5].

2.2.3 Kapacitní balance stávajících výpustí VD Vranov v porovnání s údaji MR

V následujícím přehledu jsou uvedeny kapacity výpustí při úplném otevření uzávěrů a to při provozu:

- 1 výpusti, kdy hladina dolní vody ve vývaru neovlivňuje vytékající proud, tedy spád je dán odlehlostí úrovně hladiny v nádrži od osy výpusti na kótě 307,45 m n. m.,
- 4 provozujících výpustí, kdy úroveň hladiny na prahu vývaru je výše než úroveň osy výpusti, spád je brán jako odlehlost hladinových úrovní.

Závislost úrovně hladiny na vývarovém prahu byla převzata ze zprávy [2], závislost je sestavená z vypočtených průběhů hladiny od jezu Formosa a byla poskytnuta Vodohospodářským dispečinkem Povodí Moravy, s. p. Při ovlivnění kapacity je brána úroveň hladiny v dolní zdrži, byť je reálná úroveň při menších průtocích nižší, vodní proud „odtlací“ masu vody a výtokový paprsek nebo jeho část jsou nezatopeny. Přesnou míru ovlivnění bez hydraulické zkoušky (modelové či na díle) zatím určit nelze.

Provoz při neovlivnění kapacit výpustí při úrovních hladin vyšších než úroveň přelivné koruny (350,10 m n. m.) prakticky nepřichází v úvahu, se zvyšujícím přepadajícím množstvím se zvyšuje úroveň hladiny ve vývaru. Z tohoto důvodu nejsou v tabulkách 6 a 7 posuzovány poměry při úrovni maximální hladiny v nádrži 351,45 m n. m.

Tab. 6 Kapacita výpusti s válcovým uzávěrem stanovená ze zpracovaných výsledků měření na díle při úplném otevření uzávěrů a neovlivnění hladinou vody ve vývaru (provoz 1 výpusti)

Kóta hladiny v nádrži [m n. m.]	Kóta hladiny na konci vývaru [m n. m.]	Spád brutto (odlehlost hladiny od osy výpusti) [m]	Průtok výpustí [m ³ .s ⁻¹]	Kapacita výpusti dle textové části MŘ [m ³ .s ⁻¹]	Rozdíl průtoku dle zpracovaného měření a MŘ [m ³ .s ⁻¹]
M _{ro} = 350,10	306,85	42,65	47,00	43,80	3,20
M _z = 348,45	306,80	41,00	46,10	42,95	3,15
M _{sn} = 331,45	306,60	24,00	35,20	31,90	3,30

Tab. 7 Kapacita výpusti s uzávěrem typu Johnson stanovená ze zpracovaných výsledků měření na díle při úplném otevření uzávěrů a neovlivnění hladinou vody ve vývaru (provoz 1 výpusti)

Kóta hladiny v nádrži [m n. m.]	Kóta hladiny na konci vývaru [m n. m.]	Spád brutto (odlehlost hladiny od osy výpusti) [m]	Průtok výpustí [m ³ .s ⁻¹]	Kapacita výpusti dle textové části MŘ [m ³ .s ⁻¹]	Rozdíl průtoku dle zpracovaného měření a MŘ [m ³ .s ⁻¹]
M _{ro} = 350,10	306,85	42,65	40,3	41,5	- 1,2
M _z = 348,45	306,80	41,00	39,5	40,7	- 1,2
M _{sn} = 331,45	306,60	24,00	30,2	31,5	- 1,3

Při ovlivnění je uvažována v bilanci situace při maximální úrovni hladiny v nádrži na kótě 351,45 m n. m. a odtoku z díla 620 m³.s⁻¹ (součet průtoků 4 výpusti + přepad přes přelivy), úroveň hladiny dolní vody na kótě 311,30 m n. m. je extrapolována z dodané zmíněné konzumční křivky.

Tab. 8 Kapacita výpusti s válcovým uzávěrem stanovená ze zpracovaných výsledků měření na díle při úplném otevření uzávěrů a ovlivnění hladinou vody ve vývaru (provoz 4 výpustí)

Kóta hladiny v nádrži [m n. m.]	Kóta hladiny na konci vývaru [m n. m.]	Spád brutto (odlehlost hladin při ovlivnění) [m]	Průtok výpustí [m ³ .s ⁻¹]	Kapacita výpusti dle textové části MŘ [m ³ .s ⁻¹]	Rozdíl průtoku dle zpracovaného měření a MŘ [m ³ .s ⁻¹]
M _{max} =351,45	311,30	40,15	45,6	36,40	9,20
M _{ro} = 350,10	309,00	41,10	46,1	43,80	2,30
M _z = 348,45	308,95	39,50	45,2	42,95	2,25
M _{sn} = 331,45	308,60	22,85	34,4	31,90	2,50

Tab. 9 Kapacita výpusti s uzávěrem typu Johnson stanovená ze zpracovaných výsledků měření na díle při úplném otevření uzávěrů a ovlivnění hladinou vody ve vývaru (provoz 4 výpustí)

Kóta hladiny v nádrži [m n. m.]	Kóta hladiny na konci vývaru [m n. m.]	Spád brutto (odlehlost hladin při ovlivnění) [m]	Průtok výpustí [m ³ .s ⁻¹]	Kapacita výpusti dle textové části MŘ [m ³ .s ⁻¹]	Rozdíl průtoku dle zpracovaného měření a MŘ [m ³ .s ⁻¹]
M _{max} =351,45	311,30	40,15	39,1	35,1	4,0
M _{ro} = 350,10	309,00	41,10	39,6	41,5	-1,9
M _z = 348,45	308,95	39,50	38,8	40,7	-1,9
M _{sn} = 331,45	308,60	22,85	29,5	31,5	-2,0

Pokud porovnáváme průtokové kapacitní údaje textové části MŘ a stanovené hodnoty s využitím zpracovaných výsledků měření na díle za reálně kontrolovatelných provozních podmínek, vychází v souhrnu kapacit potěšitelná shoda. Údaje v tabulkové i grafické části MŘ se od údajů v textové části odlišují, v tabulkové části jsou nižší, v grafické vyšší. Výsledky při souběhu průtoků přepadajícího přes přeliv a všech výpustí lze velmi těžko z dostupných údajů posuzovat, navíc hodnoty nejsou reálně kontrolovatelné.

Pod tabulkou kapacit výpustí v tabulkové části MŘ (tab. 20) je uvedena poznámka, že při hladině 353,45 m n. m. (odtok přelivem 980 m³.s⁻¹) dochází k poklesu kapacity Johnsonových uzávěrů na 36,5 m³.s⁻¹ v důsledku vzestupu hladiny ve vývaru. U válcových uzávěrů takový údaj uveden není. Dle výpočtů a extrapolované úrovní hladiny dolní vody 312,50 m n. m., což je údaj silně orientační, činí průtok výpusti s válcovým uzávěrem 46,0 m³.s⁻¹ a uzávěrem Johnson 39,5 m³.s⁻¹.

Porovnáním kapacit vyjádřených pro přepočtené reálné poměry stanovené ze zpracovaných výsledků měření vyplývá relativně větší rozdíl mezi odtokem z výpusti s Johnsonovým a válcovým uzávěrem, což je v souladu s očekáváním a potvrzuje poznámku zjištění ve zprávě [2]. Jednoznačně je zde potvrzena nesprávnost a nespolehlivost průtokových údajů uvedených v tabulkové části MŘ.

2.3 Zhodnocení proudových poměrů ve stávajících výpustích

Výpusti jsou vystaveny relativně velkému spádu, který iniciuje při ploše výstupního průřezu z uzávěrů relativně velkou rychlost v nich i prostorách regulačních prvků. Průřezové rychlosti dosahující hodnot přes 20 m.s⁻¹, v extrémech dokonce i 23 m.s⁻¹, jsou na potrubích spodních výpustí provozně neobvykle vysoké, což konstatuje i zpráva [2]. Při zvoleném po délce konstantním vnitřním průměru výpusti nedochází, s výjimkou vtokové části, při proudění v potrubí ke vzniku nežádoucích podtlaků ani kavitačních jevů. Vlastní konfuzorový vtok řešený kónickým zúžením se podílí cca 30 % na celkové ztrátě mechanické energie na trase od vtoku po vstup do uzávěru. Bohužel přechod kónického konfuzoru na prizmatický profil výpusti vytváří kontrakci proudu v počátečním úseku výpusti. Do stropní části tohoto úseku s kontrakcí je zaústěno zavzdušňovací potrubí. V profilu zaústění zavzdušňovacího potrubí dochází k poklesu tlaku až na úroveň mírných podtlaků, což způsobuje vtahování vzduchu do spodní výpusti.

Orientačně předpokládejme průtok výpustí 40 m³.s⁻¹, plocha průtočného průřezu v prostoru zaústění zavzdušňovacího potrubí při odhadu kontrakce ($\varepsilon = 0,75$) činí 1,5 m², průřezová rychlost dosahuje hodnoty 26,7 m.s⁻¹. Rychlostní výška v daném profilu dosáhne při předpokládané hodnotě Coriolisova kritéria 1,1 (pole je deformováno konfuzí) 40,0 m. Když

od tlačné výšky brutto odečteme tuto hodnotu doplněnou ještě částí ztrátové výšky, potvrdíme v uvedeném profilu vznik podtlaků vůči tlaku atmosférickému. Pokles je příčinou přisávání vzduchu do proudu ve výpusti a tlakových pulzací při dopravě vzduchových „pytlů“ poproudním směrem. Současně je nutno potvrdit, že ve výpusti nedochází ke kavitačním jevům pravděpodobně s výjimkou koncových uzávěrů při nefunkčnosti jejich zavzdušnění. K zamezení zavzdušnění regulačních uzávěrů dochází však až při vysoké úrovni vody ve vývaru.

Potvrzení přisávání vzduchu i doprovodných tlakových, tedy i průtokových, pulzací je patrné z dodaného videozáznamu z provozních zkoušek všech 4 regulačních uzávěrů. Jedná se o záznam vždy z kontinuálního procesu otvírání a následném zavírání uzávěru. Od určité meze otevření uzávěru dochází při postupném dalším otvírání a zvyšování průtoku výpustí k nestabilitě výtokového paprsku a k pulzačním výstřikům vodní tříště v profilu čelní stěny rozrážeče, viz obr. 10 a 11. K tomuto jevu dochází u všech výpustí, vybavených uzávěry válcovými i typu Johnson. Nestability při převádění zvýšených průtoků spodními výpustmi jsou doprovázeny i jevy akustickými.

Průtok přisávaného vzduchu zavzdušňovacím potrubím při zvýšeném odtoku spodní výpustí je možné, pakliže to rychlostní pulzace a samozřejmě i přístup ke vstupnímu profilu dovolí, prověřit vhodným typem anemometru (zřejmě s vrtulkou či mikrovrtulkou). Možné řešení odstranění nestabilit se nabízí instalováním ventilu s funkcí mechanického případně řízeného otvírání při dosažení meze podtlaku (při vypouštění výpusti) nebo přetlaku (při plnění výpusti po předchozích revizích). Toto řešení též navrhuje jeden ze závěrů uvedených ve zprávě z komplexní prohlídky [12]. Mez otevření je možné nastavit i jako pojistku proti dosažení nežádoucích hodnot nízkých tlaků dosažených při provozu výpusti.

Současné instalované koncové regulační uzávěry na spodních výpustích nejsou zdrojem uvedených nestabilit, tyto jsou uzávěry pouze poproudně přenášeny. Jak vyplývá i ze zprávy z prohlídky, nejsou povrchy výrazněji kavitačně napadeny. Vzhledem k zavzdušnění protékanych oblastí kavitačně choulostivých u uzávěru typu Johnson je toto nebezpečí potlačeno. Zavzdušnění je od určitého extrémního průtoku zcela zamezeno „ucpáním“ zavzdušňovacích profilů dolní vodou ve vývarovém prostoru. Pokud aplikujeme hodnotu součinitele kavitace $\sigma_{kr} = 1,6$ ze zkoušek uvedených ve zprávě [13] na podmínky při zamezení přístupu vzduchu do kritických míst uzávěru, lze při aplikaci vztahu (8) čekat intenzivní kavitaci od průtoku jednou výpustí $Q = 22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Hodnotu převzatou ze zprávy [13] lze brát spíše orientačně, zkoušky nebyly prováděny přímo na uvedeném typu uzávěru Johnson, ale na kuželových uzávěrech, byť kritická místa vzniku kavitace v nich jsou shodná.

Jistě by bylo možné provést stavební úpravu vtokové části, tato však nepřinese větší kapacitní efekt. Úprava zvětšením vstupní plochy průtočného průřezu a prodloužením konfuzorového (asi přechodového dílu při volbě vstupního profilu obdélníkového) dílu by však rozhodně odstranila výskyt podtlaků a tedy i přisávání vzduchu zavzdušňovacím potrubím. Jedná se však o úpravy stavebně náročné, jejichž provádění by vyžadovalo vypuštění nádrže. Domnívám se, že se provozovatel pro tuto úpravu nerozhodne. Zvětšení světlosti potrubí výpusti by bylo jistě vhodné, domnívám se však, že z uvedeného důvodu nebude zvoleno. Pokud bude vyžadována vyšší kapacita výpusti, lze ji zvýšit pouze odpovídajícím typem koncového regulačního uzávěru případně doplněného difuzorovým rozšířením jeho výstupu. Difuzorové rozšíření by však muselo být prováděno na relativně větší délce prvku při dodržení celkem striktních zásad stupně difuzornosti pro zamezení odtržení tranzitního proudu od obtékaného povrchu. Osobně se domnívám, že dále doporučené řešení plně vyhoví kapacitním požadavkům uvedeným v současné textové části MŘ.

Při průtoku $Q = 46,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ vzniká na výpusti při úplném otevření revizního uzávěru ztrátová výška mechanické energie 14,2 m.

Pokud porovnáme kapacitu výpusti při úrovni hladiny v nádrži na kótě 348,45 m n. m. vybavenou válcovým uzávěrem $Q = 46,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ s teoretickým předpokladem $Q = 45,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ při nejpříznivějších hydraulických podmínkách, vychází celkem dobrá shoda potvrzující prakticky neexistenci dalších vlivů zvyšujících ztrátu mechanické energie. Tedy zmiňované vzniky úplavů v zónách odtržení proudu při případném neúplném vyhrazení se na energetické bilanci neprojevují, mohou však být iniciátorem případných tlakových pulzací šířících se poproudě. Pokud odtržení vzniká, je jeho dopad na tlakové a průtokové pulzace silně zastíněn předchozím rozebíraným snížením tlaku v určitém průtokovém pásmu v profilu začátku prizmatického úseku výpusti DN 1600.

Pokud nebude nutné zvyšovat kapacitu výpustí uvedenou v textové části MŘ, lze z kapacitních i provozních poměrů části výpustí od vtoků po vstupní profil koncových uzávěrů zachovat ve stávajícím uspořádání a vyměnit pouze uzávěry koncové.

Ve zprávě [2] je uvedena zmínka, že návodní tabule mohou ve vyhrazené poloze zasahovat shora do profilu vtoku (viz výše). Tomu by napovídalo i to, že při provozu výpustí je údajně možné slyšet burácivý zvuk podobný hřmění za bouřky. To by se dalo vysvětlit tak, že za dolní hranou tabule vzniká masivní úplav zmenšující podstatně průtočnou plochu a tedy i kapacitu. Osobně se však domnívám, že akustické efekty souvisejí s výše rozebíranou příčinou pulzací od přisávaného vzduchu do výpusti na začátku prizmatického úseku.

Jak je ve zprávě [2] uvedeno, je vhodné provést provozní zkoušku, která může objasnit příčinu tlakových nestabilit na výpusti. Odtrhávání proudu za tabulí zasahující do průtočného průřezu může být příčinou tlakových nestabilit, na snížení kapacity výpusti se však projeví nejpravděpodobněji zanedbatelně, což je doloženo i výsledky předloženými v kapitole 2.3.

Provozovatel uvádí, že se v běžném provozu uzávěry Johnson neotevírají na maximum, ale jen na 94 % plného otevření. Potom údajně jejich kapacita již neroste, ale pomalu klesá. Důvodem bude zřejmě odtržení vodního paprsku od obtékaného povrchu při nedostatečném přítlaku hydraulickým tlakem v potrubí. Toto konstatuje a tím i potvrzuje článek [3] a zpráva [5], s tímto závěrem se plně shodují.

Vzhledem k vysokým rychlostem proudu ve výpusti a zejména v samotných regulačních uzávěrech je nutné věnovat pozornost při výběru vyměňovaného uzávěru i kavitačnímu nebezpečí.

2.4 Kapacitní požadavek vyplývající z manipulačního řádu VD Vranov

Manipulační řád uvádí plné využívání kapacit spodních výpustí (při plném otevření) do úrovně hladiny vody v nádrži VD Vranov na kótě 350,10 m n. m., v tomto případě je uváděn průtok výpustmi $2 \times 41,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 83,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Johnson), $2 \times 43,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 87,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (válec), tedy celkem $170,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Při úrovni hladiny v nádrži 348,45 m n. m. je uváděna kapacita $2 \times 40,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 81,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Johnson), $2 \times 42,95 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 85,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (válec), tedy celkem $167,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Celkový ovladatelný odtok z nádrže (bez odtoku přelivem) je:

- spodními výpustmi $2 \times 43,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} + 2 \times 41,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
- elektrárnou $3 \times 15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (max. až $17 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),
- celkem cca $220 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

V případě nepříznivého vývoje v povodí nad nádrží je možné při povodni operativně předpusťt odtokem $130 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (po zabezpečení obce Vranov n. Dyjí až $220 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) v době, kdy bude aktuální přítok do nádrže nižší. Při předpouštění se předpokládá využití kapacity všech úplně otevřených spodních výpustí $175 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ při úrovni hladiny 350,10 m n. m. Při této předpouštěcí manipulaci se počítá též s kapacitou MVE činící $45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Pouze poznamenejme, že kapacity uváděné v tabulkové části MŘ jsou mírně nižší, pro další návrhy a posuzování jsou převzaty hodnoty z části textové.

Pro návrh rekonstruovaných případně nových spodních výpustí, za předpokladu jejich shodného řešení a zachování současného počtu 4, jsou převzaty kapacitní charakteristiky **jedné přepočtené výpusti dané průtokem** $167,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} : 4 = 41,82 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ **při úrovni hladiny v nádrži 348,45 m n. m.** Tento požadavek předpokládá otevření všech 4 výpustí při odpovídající úrovni hladiny vody v dolní zdrži (vývarovém prostoru). Při uvedeném celkovém průtoku činí dle dodané konzumní křivky úroveň hladiny dolní vody 308,95 m n. m., rozdíl úrovní hladin (spád brutto) činí $H_b = 39,5 \text{ m}$. Tyto dvě hydraulické charakteristiky jsou směrodatné pro návrh uzávěru při budoucích rekonstrukcích spodních výpustí VD Vranov.

Odtud vyplývají následující požadavky na hraniční charakteristiky rekonstruovaných spodních výpustí se stávajícím vtokem i potrubím vybavených novými koncovými uzávěry:

- $H_b = 39,5 \text{ m}$ (při ovlivnění provozem 4 plně otevřených výpustí),
- $Q = 42 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
- průřezová rychlost v potrubí i vstupním profilu (vztažném průřezu) $v = 20,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Za těchto podmínek se ve výpusti (od vtoku po vstupní profil uzávěru) realizuje ztrátová výška $h_z = 11,8 \text{ m}$, tedy spád na uzávěr H_u činí 27,7 m.

$$H_u = H_b - h_z = H_b - k_{vtok+tření} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (6)$$

kde hodnota součinitele $k_{vtok+tření} = 1,532 - 1,000 = 0,532$ je převzata ze zpracovaného měření na díle, viz kapitola 2.2.2.1.

Po dosažení do energetické bilance obdržíme minimální hodnotu výtokového součinitele $\mu = 0,896$ (vztaženo k vstupnímu profilu uzávěru DN 1600). Tisíciny zde mají ryze orientační doprovodný charakter, relativní nejistotu těchto hodnot lze očekávat cca 5 %.

Hodnota výtokového součinitele je dána vztahem mezi spádem na uzávěr H_u a průtokem Q :

$$\mu = \frac{Q}{s_{1,6} \sqrt{2gH_u}} \quad (7)$$

Ze zpracovaných výsledků měření na díle vychází hodnota výtokového součinitele instalovaného uzávěru typu Johnson na výpusti VD Vranov $\mu = 0,804$. I tato hodnota opět prokazuje nižší kapacitu v porovnání s kapacitou požadovanou (průměrnou pro všechny 4 výpusti). V současných provozních podmínkách je tato snížená kapacita použitého uzávěru typu Johnson kompenzována vyšší kapacitou uzávěru válcového pro dosažení celkové kapacity všech výpustí uvedené textovou částí MŘ [1].

2.5 Koncové regulační uzávěry kapacitně vhodné pro instalaci na stávající výpusti VD Vranov

Jako koncové regulační uzávěry spodních výpustí jsou v současné době používány uzávěry:

- segmentové (v přímé i obrácené orientaci hradicího segmentu vzhledem k výstupnímu konfuzoru),
- rozstřikovací,
- prstencové (typ Johnson),
- kuželové (jsou využívány spíše do potrubí s tlakovým výstupem).

V následující bilanci budou posuzovány stavy při zcela otevřených obou uzávěrech (koncovém regulačním i revizním) na výpusti.

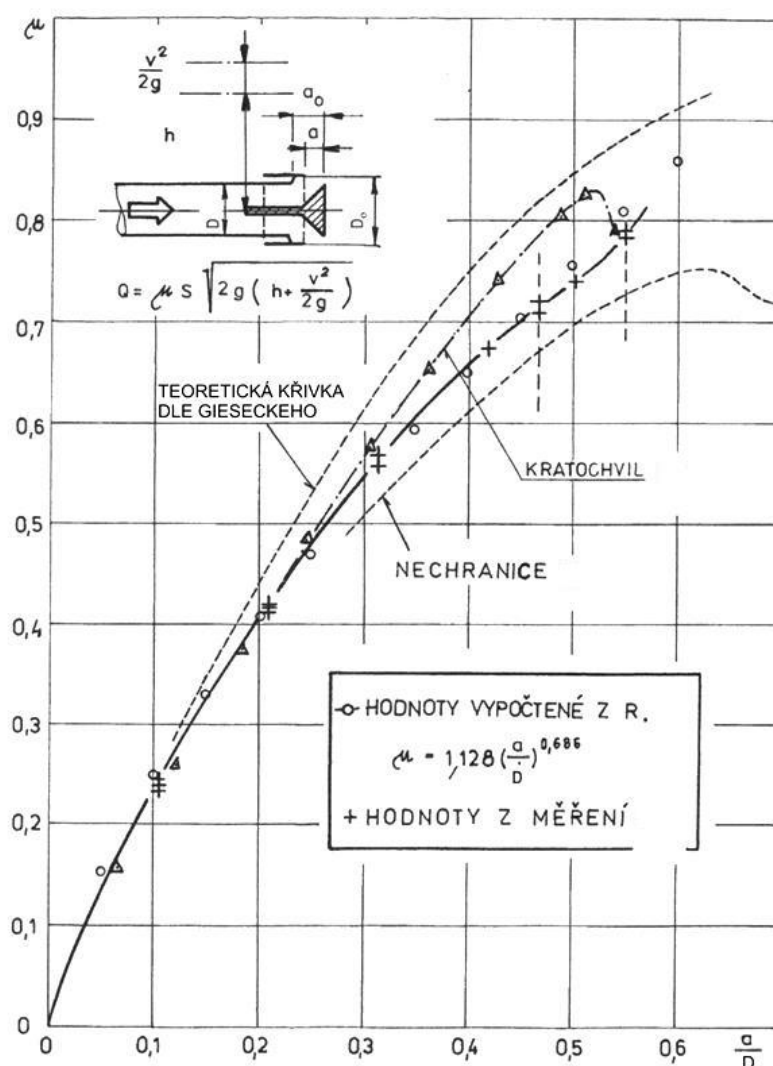
Jak již bylo potvrzeno zpracovanými výsledky na díle, použitý uzávěr **typu Johnson** (byť upraveného obtékaného povrchu) kapacitně využít nelze. Poměr plochy vstupní k ploše

výstupní u uzávěru tohoto typu na VD Vranov činí $S_{1,6}/S_{\text{výstup}} = 2,01 \text{ m}^2/1,85 \text{ m}^2 = 1,086$. Hodnota výtoku součinitele $\mu = 0,804 < 0,900$ (hodnota požadovaná pro regulační koncový uzávěr stejného typu umístěného na stávajících výpustích DN 1600). Tisíciny zde mají ryze orientační doprovodný charakter, relativní nejistotu těchto hodnot lze očekávat cca 5 %.

Pokud bychom připustili i zvětšení plochy výstupního mezikruží na plochu shodnou s plochou vstupní (do uzávěru), nebylo by však dosaženo požadované kapacity a provozně by se mohly vyskytnout jak průtokové, tak tlakové nestability. Tento typ je pro požadovanou rekonstrukci nedoporučitelný.

Rozstříkovací uzávěr v typizovaném provedení s relativním otevřením $a/D = 0,5$ vyráběným v Evropě garantuje hodnotu výtoku součinitele $\mu = 0,75$. Tato hodnota byla potvrzena řadami měření na modelu i na vlastních dílech, poznatky jsou shrnuty v [5, 6]. Pro zvláštní případ byl proveden modelový výzkum, následně potvrzený i měření na díle, rozstříkovacího uzávěru „přetopeného“, kde poměr a/D činil 0,7, toto umožnilo zvýšit hodnotu součinitele $\mu = 0,82$, což lze považovat za hodnotu konečnou. Vyšší poměr otevření prokazuje již snížení kapacity [5]. Odtud vyplývá, že použití tohoto typu uzávěru v provedení DN 1600 na konci stávajících výpustí VD Vranov kapacitně nevyhoví.

Průběh hodnot výtoku součinitelů rozstříkovacích uzávěrů v závislosti na otevření je předložen na obr. 3.

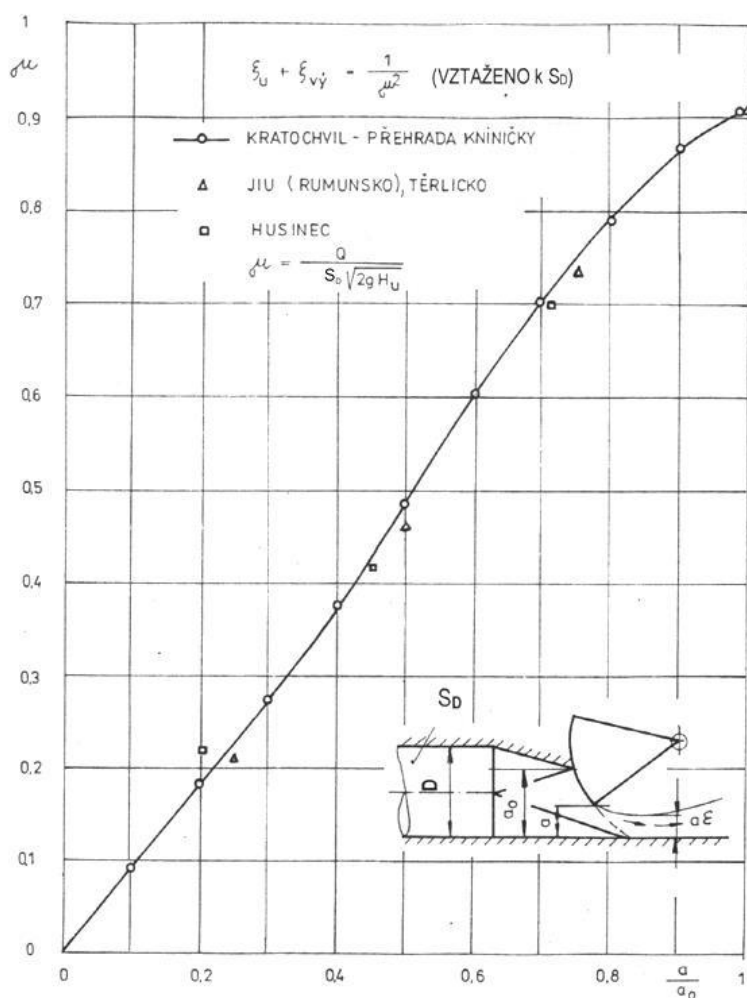


Obr. 3 Součinitelé výtoku rozstříkovacích uzávěrů [5]

Segmentový uzávěr v očekávaném obráceném uspořádání pro spodní výpusti VD Vranov má dle [2] čep umístěný na přechodovém konfuzorovém koncovém dílu. Orientace osy otáčení (osy křivosti) se projeví na charakteristice uzávěru v mezipolohách, při úplném otevření se neprojeví. Kapacita při úplném otevření je při shodných proudových vstupních podmínkách určena tvarem konfuzoru. Výstupní profil je vždy pravoúhlý. Kapacita při úplném otevření je tedy určena osovou délkou konfuzoru, poměrem ploch vstupního a výstupního průřezu, poměrem stran výstupního obdélníku a orientací osy konfuzoru (při asymetrickém provedení se využívá orientace výstupního proudu směrem ke dnu zdrže). Poměr ploch (stupeň zúžení) se pohybuje v praxi v rozmezí 1,0 až 1,1. Je poměrně zajímavé, že hodnoty výtokových součinitelů segmentových uzávěrů odlišných konfuzorností se při úplném otevření relativně málo liší. Ve zdrojích [4, 5, 7, 8, 9] jsou uvedeny následující hodnoty pro konkrétní poměr $n = S_{\text{vstup}}/S_{\text{výstup}}$:

- VD Husinec (Blanice) , $n = 1,0$, $\mu = 0,90$,
- VD Brno – Kníničky, $n = 1,0$, $\mu = 0,91$,
- VD Jiu (Rumunsko), $n = 1,05$, $\mu = 0,9$,
- VD Souš, $n = 1,09$, $\mu = 0,87$.

Uvedené hodnoty jsou potvrzeny jak modelovými zkouškami, tak následně i měřeními na dílech. **Odtud vyplývá, že kapacitně je možné segmentový uzávěr pro instalaci na konce stávajících výpustí VD Vranov využít.**



Obr. 4 Součinitelé výtoku segmentových uzávěrů [5]

3 Posouzení návrhů rekonstrukce regulačních uzávěrů spodních výpustí

Ve zprávě [2] jsou předloženy 4 varianty rekonstrukcí spodních výpustí VD Vranov. Zde (kap. 3.1.2.) bude posuzováno pouze hydraulické hledisko předložených variant č. 3 a 4 rekonstrukce. Ve věci předložených návrhů nutno upozornit na nedostatek kapacity rozstřikovacího uzávěru při akceptaci vstupního průměru DN 1600 (viz kap. 2.5.).

Již při prvním náhledu bych i já preferoval řešení výměny koncových uzávěrů za uzávěry shodného typu.

3.1 Návrh rekonstrukce regulačních uzávěrů VD Vranov předložený ve zprávě [2]

V kapitole 3.1 je uvedeno shrnutí hydraulických i provozních důvodů pro volbu vybraných variant koncových uzávěrů. Text této kapitoly je pro úplnou orientaci v mém hodnocení a následném doporučení převzat z uvedené zprávy [2].

3.1.1 Stanovení řešení variant

Stávající spodní výpusti jsou dispozičně uspořádány tak, že tvoří dvě dvojice se dvěma různými typy koncového uzávěru - válcový uzávěr a uzávěr typu Johnson. V zadávacích podmínkách k vypracování studie [2] je uvedeno, že válcové uzávěry je možné ponechat, zatímco uzávěry typu Johnson musí být vyměněny. Po upřesňujících jednáních byly stanoveny pro další konstrukční řešení následující možnosti rekonstrukce:

Válcové uzávěry:

- oprava stávajících uzávěrů a doplnění o koncový konfuzor,
- výměna za rozstřikovací uzávěr,
- výměna za segmentový uzávěr.

Uzávěry Johnson:

- výměna za rozstřikovací uzávěr,
- výměna za segmentový uzávěr.

Dále byly uvažovány následující zásady:

- v jedné dvojici spodních výpustí se použije pro obě výpusti vždy shodný uzávěr,
- pokud se budou vyměňovat všechny uzávěry, nedává smysl, aby byly různých konstrukčních typů, v tomto případě budou navrženy všechny čtyři uzávěry shodného typu.

Vzájemnou kombinací uvedených možností a aplikováním uvedených zásad byly sestaveny 4 reálné varianty řešení, po vyhodnocení jejich hydraulických, provozních, prováděcích i cenových aspektů byly jako vhodné určeny varianty 3 a 4. Tyto jsou zde v následujících podkapitolách stručně představeny při použití údajů ze zprávy [2].

Varianta 3

Všechny 4 výpusti budou vybaveny novými rozstříkovacími uzávěry.

Varianta 4

Všechny 4 výpusti budou vybaveny novými segmentovými uzávěry.

3.1.1.1 Varianta 3 - 4 x rozstříkovací uzávěr

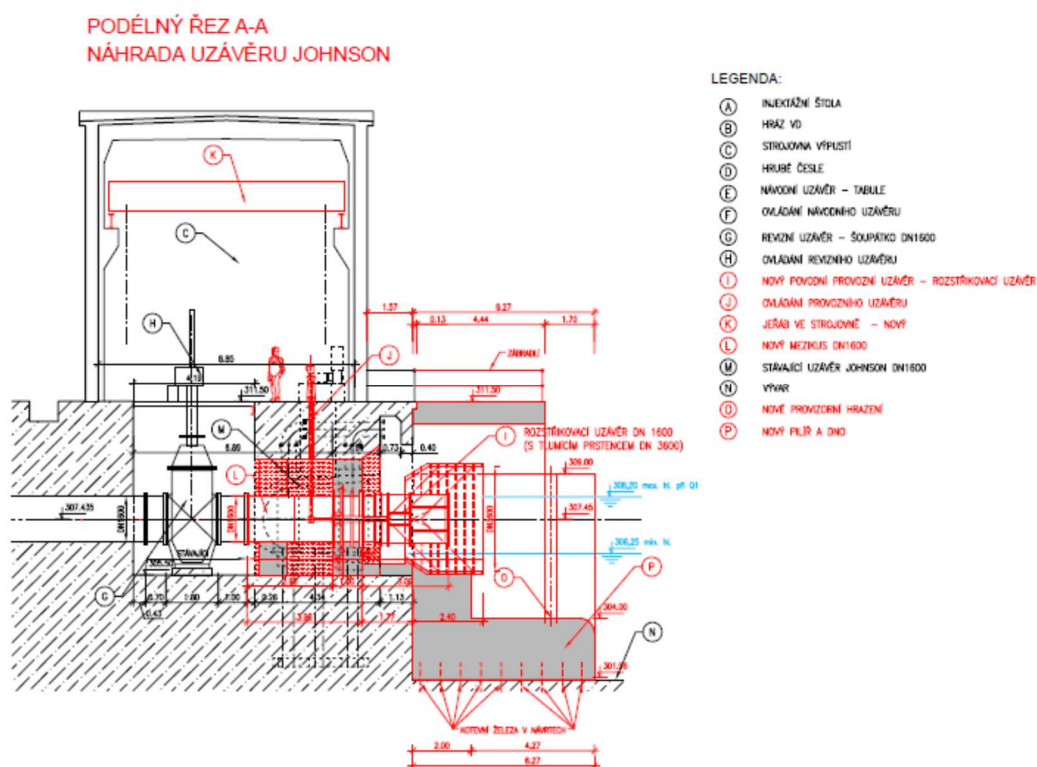
V této variantě je navrhována kompletní výměna původních válcových uzávěrů (2 ks) a uzávěrů typu Johnson (2 ks) za nové rozstříkovací uzávěry DN 1600 (4 ks) s prodlouženým zdvihem a hydraulicky vhodným usměrňovacím prstencem tak, aby bylo dosaženo maximální možné průtočné kapacity uzávěru.

Řezy komorou uzávěrů po rekonstrukci jsou představeny na obr. 5 a 6.

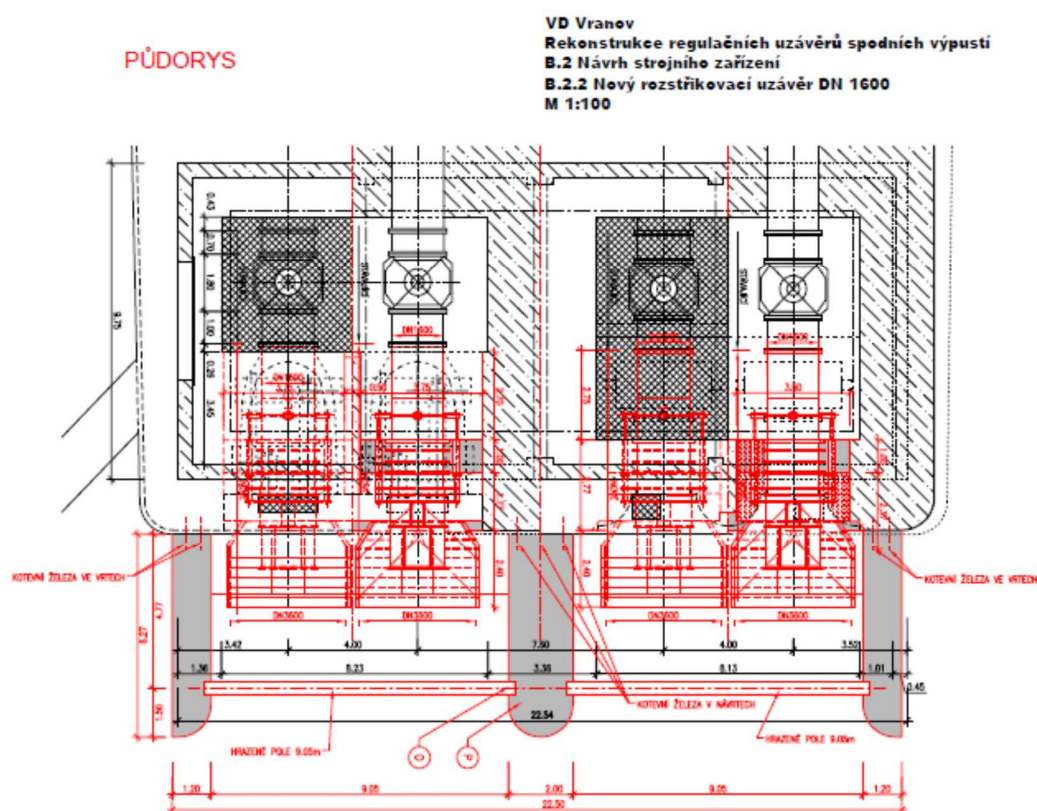
3.1.1.2 Varianta 4 - 4 x segmentový uzávěr

V této variantě je navrhována kompletní výměna původních válcových uzávěrů (2 ks) a uzávěrů typu Johnson (2 ks) za nové segmentové uzávěry (4 ks) s hydraulicky vhodným tvarem pro usměrnění paprsku vody dopadajícího do stávajícího vývaru.

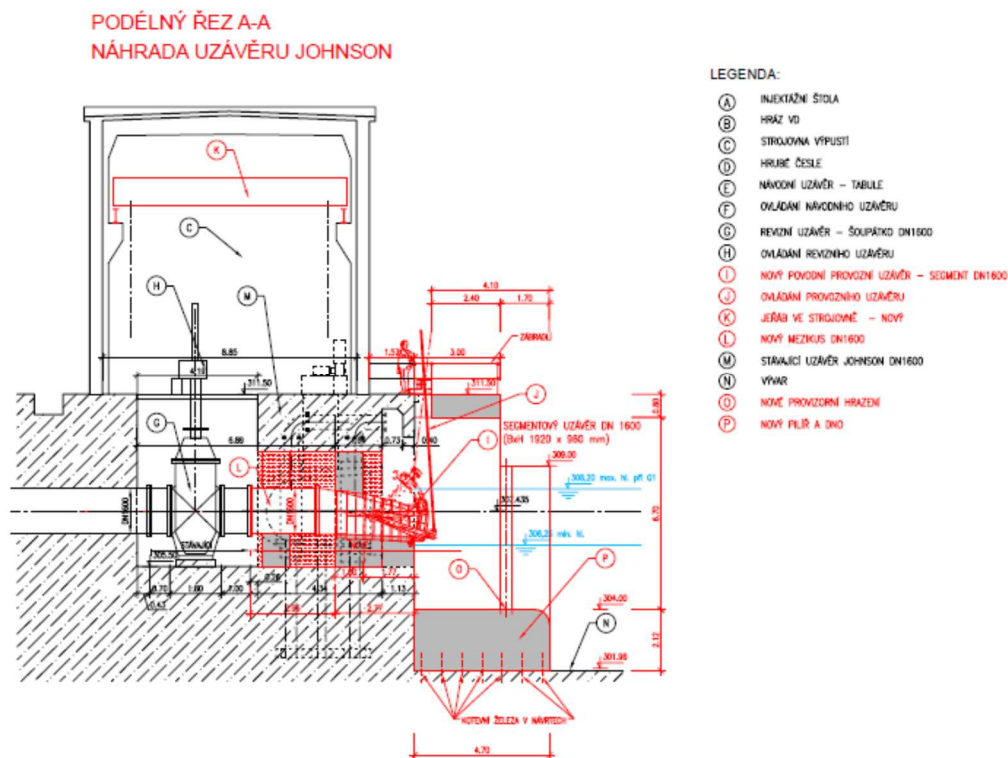
Řezy komorou uzávěrů po rekonstrukci jsou představeny na obr. 7 a 8.



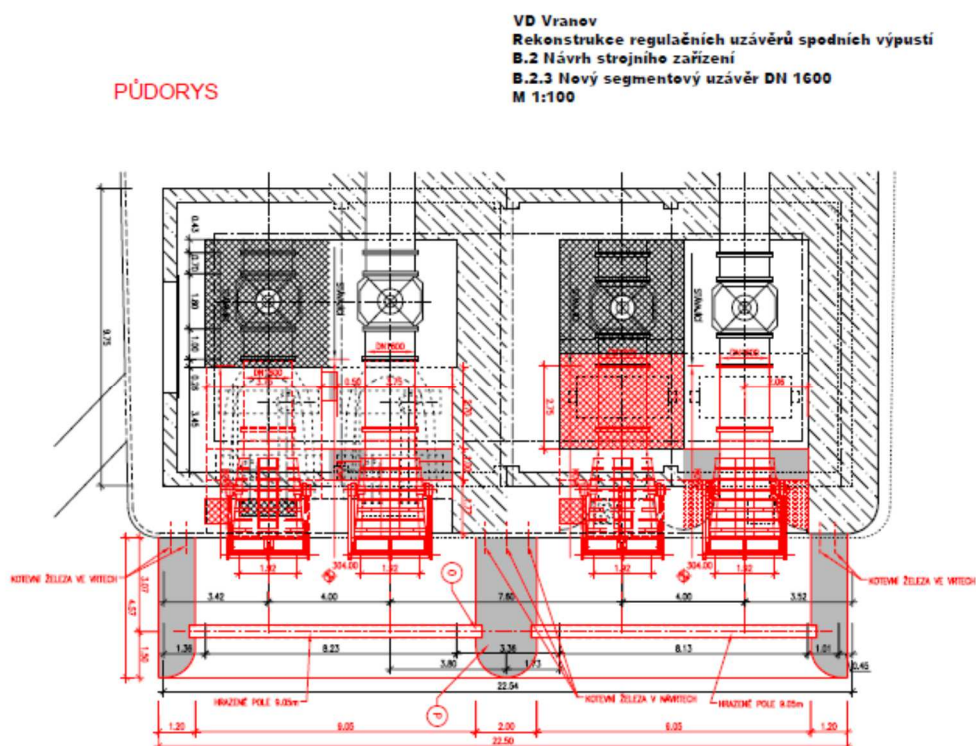
Obr. 5 Náhrada uzávěru Johnson rozštríkovacím uzávěrem dle návrhu AQUATIS, a.s. – podélný řez



Obr. 6 Náhrada uzávěru Johnson rozštríkovacím uzávěrem dle návrhu AQUATIS, a.s. – půdorys



Obr. 7 Náhrada uzávěru Johnson segmentovým uzávěrem dle návrhu AQUATIS, a.s. – podélný řez



Obr. 8 Náhrada uzávěru Johnson segmentovým uzávěrem dle návrhu AQUATIS, a.s. – půdorys

3.1.2 Vyhodnocení rozstřikovacího a segmentového uzávěru z hydraulického hlediska

Ve zprávě [2] je konstatováno, že na přehradě Vranov byly navrženy a realizovány spodní výpusti podle naprosto nevhodné koncepce. V jejím důsledku jsou koncové uzávěry při velkém otevření trvale vystaveny tlakovým pulzacím a s tím spojeným mechanickým namáháním (chvěním). S uzávěry typu Johnson se dnes nemanipuluje na plné otevření, protože při něm mají menší kapacitu, než při otevření na 94 %, kde dosahují největšího průtoku. Kapacita výpustí může být také značně citlivá na jakoukoliv (byť i náhodnou) přídavnou ztrátu na vtoku (např. přivření návodní tabule), která může mít vliv na proudové poměry v celé navazující části SV. Z toho vyplývá, že provedení rekonstrukce koncových uzávěrů SV je nanejvýš žádoucí a že při správném technickém návrhu při ní může být dosaženo stejné nebo dokonce i mírně vyšší kapacity oproti současnému stavu, případně kapacity přizpůsobené požadavku MŘ.

Ve zprávě [2] je uvedeno upozornění na nebezpečí, které je charakteristické pro rozstřikovací uzávěr s výstřiky úplně nebo zčásti do volného prostředí.

Rozstřikovací uzávěr vytváří intenzivně provzdušněný difúzní proud volně padající na hladinu, v jehož průběhu dochází ke značné disipaci kinetické energie vodního proudu. Nad hladinou se přitom vytváří v dosti mohutné vrstvě vodní tříšť přecházející postupně do difúzního oblaku kondenzující mlhoviny. Ten postupně zaplní dosti rozsáhlý prostor za otevřeným uzávěrem o délce desítek metrů.

Závažnější komplikací zde představuje přítomnost vzdušného vedení VVN zavěšeného v nepříliš velké výšce nad vývarem. Zvýšení elektrické vodivosti vzduchu nasyceného stoupajícím oblakem kondenzující vodní páry by mohlo znamenat i ovlivnění izolačních parametrů tohoto vedení. Pokud by se měla realizovat varianta s použitím rozstřikovacích uzávěrů, měl by být tento aspekt také zevrubně posouzen. Doplňme ještě poznatek již uvedený v kap. 2.5. Rozstřikovací uzávěr v typizovaném provedení s relativním otevřením $a/D = 0,5$ vyráběným v Evropě garantuje hodnotu výtokového součinitele $\mu = 0,75$. Tato hodnota byla potvrzena řadami měření na modelu i na vlastních dílech, poznatky jsou shrnuty v [5, 6]. Pro zvláštní případ byl proveden modelový výzkum, následně potvrzený i měřeními na díle, rozstřikovacího uzávěru „přetopeného“, kde poměr a/D činil 0,7, toto umožnilo zvýšit hodnotu součinitele $\mu = 0,82$, což lze považovat za hodnotu konečnou. Vyšší poměr otevření prokazuje již snížení kapacity [5]. Odtud vyplývá, že použití tohoto typu uzávěru v provedení DN 1600 na konci stávajících výpustí VD Vranov kapacitně nevyhoví.

Segmentový uzávěr vytváří kompaktní výtokový proud, který je výškově stlačený, takže zasahuje větší šířku vývaru a tím zlepšuje jeho využití. Koncový profil uzávěru je mírně skloněný směrem dolů, takže zkracuje délku dopadu výtokového paprsku na dno vývaru. Tím by se mělo zamezit nepravidelným vertikálním výstřikům vody, k nimž v současné době dochází, protože vodní paprsek dopadá zhruba do prostoru pravoúhlého koutu mezi vodorovným dnem a svislou stěnou rozrážeče. Namáhání dna bude přitom stejné nebo spíše menší, protože energie vodního proudu zůstane stejná (je dána výhradně polohou hladiny v nádrži), ale bude se uplatňovat na větší šířce výtokového proudu. Z rozboru předloženém v kap. 2.5 vyplývá, že kapacitně je možné segmentový uzávěr pro instalaci na konce stávajících výpustí VD Vranov využít.

S uvážením všech údajů a argumentů uvedených výše označuje zpráva [2] jako nejvhodnější řešení pro dané podmínky variantu č. 4 spočívající ve výměně všech stávajících uzávěrů za nové segmentové uzávěry. Protože i podle srovnání nákladů se jeví tato varianta jako nejvhodnější, je ve zprávě [2] doporučena k dalšímu sledování.

3.2 Posouzení kapacity segmentového uzávěru dle návrhu AQUATIS, a.s.

Navrhovaný vnitřní světlý výstupní průřez konfuzoru segmentového uzávěru dle návrhu předloženého ve zprávě [2] činí 1,92 m x 0,96 m, při těchto rozměrech je poměr zúžení $n = 1,09$. Jedná se prakticky o stejný poměr zúžení, který je použit na shodně řešeném segmentovém uzávěru spodní výpusti VD Souš (tzv. obrácený segment s čepy na konfuzoru konstrukce uzávěru). Hydraulickým výzkumem i zkouškami na vlastním díle byla potvrzena při úplném otevření hodnota výtokového součinitele $\mu = 0,87$ [9].

Pro dosažení požadované hodnoty výtokového součinitele $\mu = 0,90$, jak je potvrzeno v předchozím textu (kapitoly 2.4 a 2.5), lze doporučit zvětšení výšky výstupního průřezu na 1,00 m, tedy rozměry výstupního průřezu 1,92 m x 1,00 m.

Uspořádání komory doporučuji ponechat dle návrhu zprávy [2]. Tvar dělicích pilířů, zejména jejich délka může být oproti návrhu ve zprávě [2] změněna na základě výsledků případného modelového výzkumu.

Kapacita spodních výpustí se segmentovými regulačními uzávěry doporučeného rozměru je uvedena při charakteristických úrovních hladin pro ovlivněný i neovlivněný stav dolní vodou v následujících dvou tabulkách. Jedná se o stav při obou zcela otevřených uzávěrech (revizním i provozním - regulačním) na výpusti.

Tab. 10 Kapacita výpusti s doporučeným segmentovým uzávěrem - úplné otevření obou uzávěrů na výpusti a neovlivnění hladinou vody ve vývaru (provoz 1 výpustí)

Kóta hladiny v nádrži [m n. m.]	Kóta hladiny na konci vývaru [m n. m.]	Spád brutto (odlehlost hladiny od osy výpusti) [m]	Průtok výpustí [m ³ .s ⁻¹]	Kapacita výpusti dle textové části MŘ (válcový uz.) [m ³ .s ⁻¹]	Rozdíl průtoků dle zpracovaného měření a MŘ [m ³ .s ⁻¹]
M _{ro} = 350,10	306,85	42,65	43,8	43,80	0,00
M _z = 348,45	306,80	41,00	42,9	42,95	-0,05
M _{sn} = 331,45	306,60	24,00	32,8	31,90	0,90

Tab. 11 Kapacita výpusti s doporučeným segmentovým uzávěrem - úplné otevření obou uzávěrů na výpusti a ovlivnění hladinou vody ve vývaru (provoz 4 výpustí)

Kóta hladiny v nádrži [m n. m.]	Kóta hladiny na konci vývaru [m n. m.]	Spád brutto (odlehlost hladin při ovlivnění) [m]	Průtok výpustí [m ³ .s ⁻¹]	Kapacita výpusti dle textové části MŘ (válcový uz.) [m ³ .s ⁻¹]	Rozdíl průtoků dle zpracovaného měření a MŘ [m ³ .s ⁻¹]
M _{max} =351,45	311,30	40,15	43,5	36,40	9,20
M _{ro} = 350,10	309,00	41,10	43,0	43,80	-0,80
M _z = 348,45	308,95	39,50	42,1	42,95	-0,85
M _{sn} = 331,45	308,60	22,85	32,0	31,90	0,10

Při ovlivnění je uvažována v bilanci situace při maximální úrovni hladiny v nádrži na kótě 351,45 m n. m. a odtoku z díla 620 m³.s⁻¹ (součet průtoků 4 výpustí + přepad přes přelivy), úroveň hladiny dolní vody na kótě 311,30 m n. m. je extrapolována z dodané v předchozím textu uvedené konzumční křivky. Údaj v prvním řádku této tabulky při stavu maximálního ovlivnění lze brát silně orientačně, proudové poměry jsou ovlivněny úrovní hladiny dolní vody i dynamickým vlivem z levé kaskády přitékajícího proudu. Oba vlivy včetně možného dalšího vlivu kavitace protékajícího uzávěru spodní výpusti zatěžují výslednou hodnotu průtoků značnou nejistotou.

Při převádění zcela extrémního průtoku, kdy hladina v nádrži dosahuje spodní části mostní konstrukce nad přelivy (353,45 m n. m.) vychází kapacita jedné výpusti s doporučeným segmentovým uzávěrem $42,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, celková kapacita převeditelná výpustěmi činí $171,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Jedná se však o údaj silně orientační vycházející z extrapolované úrovně hladiny dolní vody při uvedeném povodňovém extrému. Dále je třeba poznamenat, že segmentové uzávěry budou při tomto stavu provozu vystaveny silné kavitaci, kterou však v těchto extrémních podmínkách zřejmě bude nutné připustit.

Pouze poznamenejme, že umístění masivních dvou dnových rozrážečů nemá vliv na kapacitu výpusti jak při výtoku nezatopeném, tak i zatopeném.

Posuďme nebezpečí vzniku kavitace při maximálních rychlostních poměrech, které mohou vzniknout při provozu jedné výpusti s maximálně otevřenými uzávěry na ní a úrovni hladiny na koruně přelivu (350,10 m n. m.). Jedná se o výtok do volného i zatopeného (ovlivněného) prostředí.

3.3 Posouzení nebezpečí vzniku kavitace segmentového uzávěru

Ze zkušeností z provozu spodních výpustí vybavených válcovými uzávěry na předmětném vodním díle lze konstatovat, že nebylo shledáno v potrubí spodní výpusti kavitační ohrožení ani výraznější tlakové pulzace. Vlastní segmentový uzávěr je provozován na dalších vodních dílech při nižších spádech, než přichází v úvahu na VD Vranov. Vznik kavitace hrozí samozřejmě v místech s výskytem podtlaků pod mezí nasycených vodních par, tedy v místech s existencí vysokých rychlostí. Tyto oblasti jsou lokalizovány ostrými hranami a ohyby vyvolávajícími přirychlení proudu. U segmentů se jedná převážně o oblasti obtékaných hran regulačního prvku, zasahujícího do proudu při stavu částečného otevření. Podmínky vzniku kavitace na ostrých hranách ať hradícího segmentu, tak i vlastního výstupního profilu konfuzoru jsou silně znásobeny, oproti výtoku do volného prostředí, zatopením profilu dolní vodou.

Mez vzniku kavitace lze určit pro zvolený prvek při konkrétních okrajových podmínkách kavitačním kritériem zde použitým ve tvaru:

$$\sigma_k = \frac{p - p_w}{0,5 \rho v^2}, \quad (8)$$

kde p je **absolutní** tlak v místě posuzování (tlaková výška v podmínkách výtoku do volného prostředí při zohlednění nadmořské výšky $p_{\text{atm}}/\rho g = 9,7 \text{ m v. s.}$),

p_w je tlak nasycené vodní páry při dané teplotě a nadmořské výšce ($p_w/\rho g = 0,1 \text{ m v. s.}$),
 v je vztažná rychlost proudu.

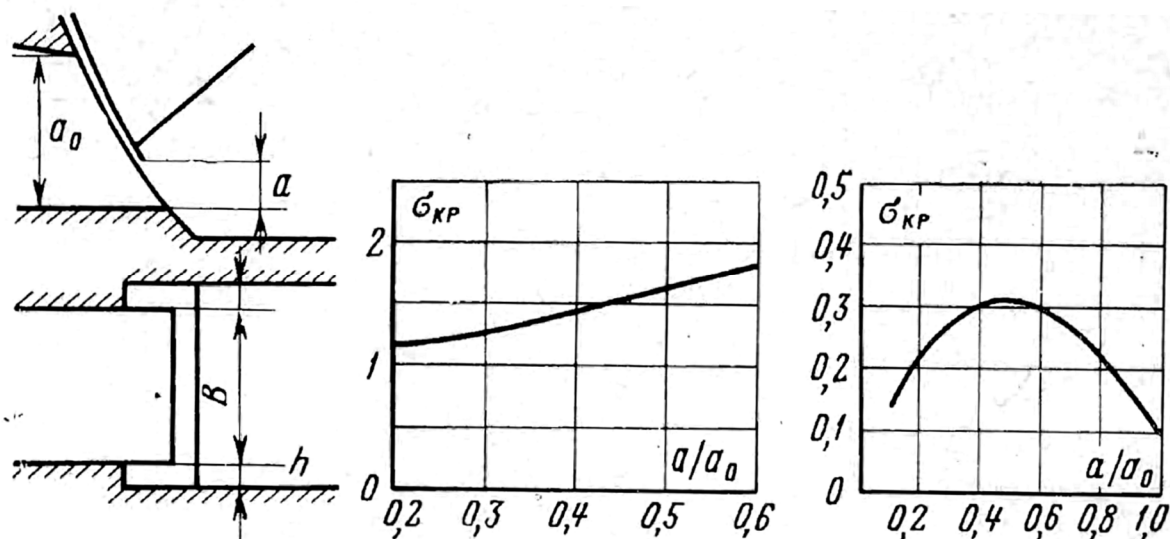
V našem případě lze využít k posouzení výskytu kavitace dvou zdrojů, kdy první uvedený [10] definuje výskyt v poměrech prakticky modelově blízkých našim posuzovaným. Hodnoty rychlostí jsou vztaženy ke vstupnímu profilu do uzávěru, jsou použity průběhy pro obrácený segment a výtok do:

- volna (neomezeného prostředí),
- zatopeného prostoru (při ovlivnění) s výtokem pod hladinu dolní vody ve vývarovém prostoru.

Při výtoku do volna se nebezpečí kavitace podstatně oddaluje pro možnost přisávání vzduchu do prostoru s podtlaky v našem případě ze všech stran paprsku, tedy i prostorem „odskoku“ na dně komory.

Jak uvádí literatura [10], činí maximální hodnota kavitačního součinitele pro obtékaný břit segmentu $\sigma_{kr} = 0,3$ při relativním otevření 0,5 a výtoku proudu do volného prostředí, tedy

shodného s naším posuzovaným případem při nezatopení. Nejnepríznivější případ z hlediska kavitace při nezatopení výtoku ze segmentu nastává při dosažení úrovně hladiny v nádrži na kótě 350,10 m n. m. a nezatopeném výtoku 1 výpustí při úplném otevření obou uzávěrů, kdy spád na uzávěr brutto činí $H_b = 42,65$ m, průtok výpustí $Q = 43,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, průřezová rychlost ve vztázném profilu $v = 21,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Proud vytéká do atmosférického prostředí, tedy $p = p_{\text{atm}} = 9,7 \text{ m v. s.}$ (hodnota daná nadmořskou výškou prostředí). Hodnota součinitele $\sigma_k = 0,40 > \sigma_{kr} = 0,3$. V tomto případě kavitace na břitech segmentu nehrozí.



Obr. 9 Kavitační charakteristiky segmentového uzávěru s výtokem do boků i dna (prahový „odskok“), prostřední obrázek reprezentuje závislost při výtoku do zatopeného prostředí, pravý při výtoku do volna

Tento provoz při nezatopení výtokového paprsku, bez výskytu kavitace na segmentových uzávěrech výpustí lze při aplikaci poznatků z realizovaných výzkumů potvrdit do úrovně hladiny na prahu vývaru 308,50 m n. m., tedy dle konzumní křivky do průtoku $Q = 120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, což odpovídá průtoku většímu než Q_1 .

Zcela odlišný případ z hlediska kavitačního nebezpečí nastává při výtoku ze segmentu do zatopeného prostoru. Případ mezní míry zatopení, jejíž přesné určení je poměrně komplikované, byl zmíněn v předchozím textu. Zatopením (ponořením) výtokového profilu dochází ke zvyšování tlaku v protékaném prostoru. Na tlakové hodnotě p (absolutní tlak), vstupující do vztahu pro vyjádření hodnoty kavitačního součinitele σ_k , se projeví převýšení hladiny dolní vody (zatopení) jejím adekvátním zvýšením.

Pro konkrétní typ obráceného segmentu a provedené konfuzornosti je charakteristická odpovídající závislost průtoku na otevření pro daný spád na uzávěr. Bohužel, tyto údaje jsou pro náš relativně dosti podobný případ dostupné pouze v DP [9]. Celkové maximální kapacity všech 4 provozovaných výpustí, při charakteristických úrovních hladin v nádrži, jsou prakticky v souladu s údaji o celkovém průtoku převáděném výpustmi z díla uvedených v textové části MŘ.

Kritická hodnota kavitačního součinitele pro segment se zatopeným výtokem dosahuje hodnoty při maximálním otevření $\sigma_{kr} = 2,4$ [10, 11].

V souladu se stávajícím manipulačním řádem předpokládáme extrémní vypouštění spodními zatopenými výpustmi při přepadu přes přelivy (kóta hladiny v nádrži 351,45 m n. m. a vyšší, kdy lze předpokládat úroveň hladiny ve vývaru na kótě 311 m n. m. případně i vyšší. Jedná se o zatopení horní hrany výstupního profilu segmentu 3,6 m, tedy celková tlaková výška činí $9,7 \text{ m v. s.} + 3,6 \text{ m v. s.} = 13,3 \text{ m v. s.}$ Průtok jednou výpustí, při němž již nedojde ke kavitaci uzávěru při stavu zatopení, lze určit ze vztahu aplikovaného na kritickou hodnotu kavitačního

součinitele $\sigma_{kr} = 2,4$. Tento stav bez kavitace lze očekávat při průtoku jednou (zatopenou) výpustí $Q = 20,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, stav je zaručen při relativním otevření segmentu 0,55, při větším otevření již lze přibližně očekávat kavitaci. Hodnota relativního otevření uzávěru je určena aplikací výsledků práce [9], lze ji považovat za přibližnou.

Korektní posouzení mezní míry zatopení i určení odpovídajícího otevření uzávěru pro bezkavitační provoz je možné provést na základě zpracovaných výsledků zkoušek z modelu případně i z díla.

3.4 Proudění ve vývarovém prostoru

Nově navrhovaný segmentový uzávěr zajišťuje kompaktní výtokový proud směřovaný ke dnu. Byť je šířka výtokového profilu prakticky shodná s vnitřním průměrem výpusti, dochází při výškové kontrakci proudu k jeho rozšiřování. Větší dopadová šířka se projeví na zvýšení homogenizace odtékajícího proudu a to zejména při samostatném provozu výpustí. Lze tedy očekávat zlepšení hydraulické funkce vývaru. Kladem řešení zvýšeným skloněním směrem ke dnu je zkrácení délky dopadu (doskoku) výtokového paprsku na dno vývaru. Toto se zcela jistě odrazí ve snížení vertikálních výstupů výstřiků v rovině návodní stěny rozrážče, což se velmi výrazně projevuje při provozu současných výpustí s oběma typy uzávěrů.

Oblast dopadu bude situována blíže výtokovému profilu, což by mohlo omezit případné výstřiky vody v profilu svislé stěny rozrážče. Namáhání dna bude přitom prakticky stejné.

Komplikovaný silně prostorový charakter proudění při součinnosti provozu výpustí a přelivu zůstane prakticky nezměněný. Možné případné zlepšení proudových poměrů pomocí usměrnění prodlouženým dělicím pilířem (dělicími pilíři) může potvrdit modelová zkouška.



Obr. 10 Narušení kompaktního povrchu výtokového paprsku a výstřiky vodní tříště v profilu čelní stěny rozrážče při větším otevření uzávěru typu Johnson spodní výpusti VD Vranov



Obr. 11 Narušení kompaktního povrchu výtokového paprsku a výstřiky vodní tříště v profilu čelní stěny rozrážeče při větším otevření válcového uzávěru spodní výpusti VD Vranov

4 Doporučení pro případné provedení hydraulických modelových a provozních zkoušek

4.1 Hydraulický modelový výzkum

V našem posuzovaném případě se jedná o spodní výpust prakticky prizmatického profilu, jejíž kapacita je silně omezena jejím vnitřním průměrem a řešením samotného vtoku. Rychlostní a tlakové poměry jsou výpočtem relativně spolehlivě stanovitelné od profilu vtoku do výpusti po vstupní profil do regulačního segmentového uzávěru. Průtok výpustí je dán při dané úrovni hladin otevřením uzávěru. Byť je těchto segmentových uzávěrů s obráceným segmentem instalováno na výpustích vodních děl více, odlišují se od sebe geometrií konfuzorové části, což má dopad na kapacitu a tedy hodnotu výtokového součinitele. Tuto hodnotu lze převzít z dosavadních publikovaných údajů relativně spolehlivě pro stav při úplném otevření, kdy orientace segmentového hradicího prvku (poproudí nebo obrácená) hodnotu neovlivňuje.

Pokud je nutné či vhodné definovat závislost průtoku spodní výpustí na úrovních hladin (horní případně při vzduť i dolní) pro různá její otevření, je doporučitelné modelový výzkum provést. Jeho výsledky by posloužily k definování přesnější manipulace s uzávěrem pro případnou úpravu odtoků z vodního díla.

Do jisté míry v našem případě zůstává větší neznámou ovlivnění kapacity výpusti přitékajícím proudem z levé kaskády.

Dokonce i vlastní ovlivnění (zatopení) proudu vytékajícího z výpusti do jisté míry uklidněnou hladinou ve vývaru lze přesně a spolehlivě určit modelovými zkouškami. Mez ovlivnění výtoku klidnou hladinou ve vývaru (bez přítoku z kaskády) závisí na schopnosti „odtlačit“ vodní masu vytékající neovlivněným proudem z výpusti, kdy v jeho čele i po jeho bocích vzniká silně prostorový přechod z nadkritického režimu do podkritického.

S ovlivněním (zatopením) výtoku je určeno i zvýšené nebezpečí vzniku kavitace, jak je uvedeno v příslušné kapitole 3.3.

Předmětný hydraulický výzkum objasní silně prostorové proudění ve vývaru ať při samotném převádění vody přes přelivná pole nebo při součinnosti proudů od spodních výpustí a přelivných polí, kdy dochází ke zvýšenému namáhání pravého břehu. Vhodné usměrnění proudu vstupujícího z kaskády zleva do vývarového prostoru je spolehlivě určitelné a potvrditelné hydraulickými modelovými zkouškami.

K provedení zkoušek pro zjištění kapacitní závislosti je nutné použít model jedné samostatně provozujícího segmentového uzávěru. Při použití zásad pro omezující podmínky modelové podobnosti [13] vyplývá doporučitelné maximální měřítko délkové podobnosti modelu segmentového uzávěru 1 : 17, hodnota vyplývá z poměru maximálního přípustného zmenšení výšky výtokového otvoru na modelu.

U úplného prostorového modelu zahrnujícího 9 bloků funkčních přelivných polí včetně 2 bloků (bez přelivů) se spodními výpustmi, kompletní kaskádu a úplný prostor vývaru vyplývá nutné maximální měřítko zmenšení 1 : 70. Při modelování přepadového paprsku za maximální přepadové výšky 1,45 m lze využít mezní hodnotu 20 mm [14].

V obou případech musejí být splněny vstupní i výstupní okrajové proudové podmínky.

4.2 Provozní zkoušky na díle

Nezávisle na modelových zkouškách lze doporučit dvě dílčí provozní zkoušky na díle, které jsou zmíněny v kapitole 2.3. Jedná se o prověření bezpečné polohy návodních tabulí spodních výpustí, kdy nezasahují do vstupních průtočných průřezů vtoků. Případné omezení plochy průtočného průřezu však při přepočtu výsledků na energetickou (kapacitní) bilanci výpusti při porovnání hodnot stanovených výpočtovým postupem a měřením na díle nebylo shledáno.

Druhá doporučitelná zkouška na díle potvrdí přisávání vzduchu do spodní výpusti při určitém otevření regulačního uzávěru. Při „ucpání“ vstupního profilu by nejpravděpodobněji mělo dojít ke zvýšení průtoku výpustí a utlumení či odstranění akustických doprovodných jevů. Za těchto zkušebních podmínek by ještě dle orientačních propočtů nemělo dojít k výskytu kritických podtlaků či vzniku kavitačních jevů (zavzdušnění koncových regulačních uzávěrů musí být funkční). Zkoušku je vhodné provést přednostně na spodní výpusti s válcovým uzávěrem, která je v porovnání s výpustí ukončenou uzávěrem typu Johnson kapacitnější.

5 Závěr

Zhodnocení stávajícího stavu spodních výpustí

Kapacitní poměry

Celková kapacita všech současně instalovaných spodních výpustí VD Vranov při úplném otevření uzávěrů na nich je z kapacitního hlediska v souladu s údaji v textové části MŘ [1]. Hodnoty průtoků z výpustí s válcovými koncovými uzávěry uváděné v MŘ [1] jsou mírně podhodnocené v porovnání s realitou, hodnoty pro výpusti s Johnsonovými regulačními uzávěry jsou v textové části MŘ [1] naopak mírně nadhodnocené. Odchyłky v případě současného provozu obou typů výpustí se prakticky vyrovnají.

Průtokové údaje v tabulkové i grafické části MŘ [1] jsou značně rozdílné a nespolehlivé.

Proudové poměry

Přechod kónického konfuzoru na prizmatický profil výpusti vytváří kontrakci proudu v počátečním úseku výpusti. Do stropní části tohoto úseku s kontrakcí je zaústěno zavzdušňovací potrubí. V profilu zaústění zavzdušňovacího potrubí dochází k poklesu tlaku až na úroveň mírných podtlaků, což způsobuje vtahování vzduchu do spodní výpusti. Toto je zdrojem tlakových a průtokových pulzací ve výpustích a snížení jejich průtokových kapacit.

Možné řešení odstranění nestabilit se nabízí instalováním ventilu s funkcí mechanického případně řízeného otvírání při dosažení meze podtlaku (při vypouštění výpusti) nebo přetlaku (při plnění výpusti po předchozích revizích). Toto řešení též navrhuje jeden ze závěrů uvedených ve zprávě z komplexní prohlídky [12]. Mez otevření je možné nastavit i jako pojistku proti dosažení nežádoucích hodnot nízkých tlaků dosažených při provozu výpusti.

Další provozní nestability jsou potvrzovány na výpustích s Johnsonovými uzávěry při jejich relativním otevření větším než 0,94. Tyto jsou doprovázeny i snížením jejich kapacity o 5 % až 7 %. Snížení průtočného množství uváděné v MŘ není tedy dáno jen zvýšením hladiny dolní vody ve vývarovém prostoru, ale zejména prouděním s doprovodnými tlakovými a průtokovými pulzacemi iniciovanými podtlaky vůči tlaku atmosférickému a přisáváním vzduchu v protékaném prostoru uzávěru. Tuto skutečnost pro daný typ uzávěru konstatuje již zpráva [5]. Uzávěry typu Johnson jsou proto otvírány pouze na 94 % jejich plného otevření.

Zhodnocení variant č. 3 a 4 studie [2]

Hledisko zachování požadované kapacity spodních výpustí

Pro zajištění minimální stávající kapacity spodních výpustí v souladu s textovou částí MŘ lze doporučit, jak je uvedeno v kapitolách 3.1.2 a 3.2 výměnu všech stávajících koncových regulačních uzávěrů za uzávěry segmentové s rozměrem průřezu výstupního profilu 1,92 m x 1,00 m.

Rozstřikovací uzávěry uváděné ve variantě 3 studie [2] nevyhoví při stávajícím rozměru výpusti DN 1600 kapacitně, viz kapitola 3.1.2.

Provozní hledisko

Závažnější komplikací, jak je uvedeno v kapitole 3.1.2, v případě použití rozstřikovacích uzávěrů dle varianty 3 studie [2] představuje přítomnost vzdušného vedení VVN zavěšeného v nepříliš velké výšce nad vývarem. Zvýšení elektrické vodivosti vzduchu nasyceného stoupajícím oblakem kondenzující vodní páry by mohlo znamenat i ovlivnění izolačních parametrů tohoto vedení.

Nově navrhovaný segmentový uzávěr zajišťuje kompaktní výtokový proud směřovaný ke dnu. Byť je šířka výtokového profilu prakticky shodná s vnitřním průměrem výpusti, dochází při výškové kontrakci proudu k jeho rozšiřování. Větší dopadová šířka se projeví na zvýšení homogenizace odtékajícího proudu a to zejména při samostatném provozu výpustí.

Lze tedy očekávat zlepšení hydraulické funkce vývaru. Kladem řešení se zvýšeným skloněním výstupního proudu směrem ke dnu je zkrácení délky dopadu (doskoku) výtokového paprsku na dno vývaru. Toto se zcela jistě odrazí ve snížení vertikálních výstupů výstřiků v rovině návodní stěny rozrážeče.

Manipulaci s těmito koncovými regulačními uzávěry je z hlediska kavitační bezpečnosti nutno přizpůsobit zásadám s omezením průtoku přivíráním segmentů v závislosti na úrovních hladin v nádrži a dolní zdrži. Zde naznačená mez, vyplývající ze zahlcení výtokového profilu uzávěru, je pouze orientační, upřesnění je vhodné definovat na základě modelových zkoušek.

Provoz bez výskytu kavitace na segmentových uzávěrech výpustí lze při aplikaci poznatků z realizovaných výzkumů potvrdit do úrovně hladiny na prahu vývaru 308,50 m n. m., tedy dle platné konzumní křivky dolního koryta do průtoku $Q = 120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, což odpovídá průtoku většímu než Q_1 .

Při zatopení uzávěru dolní vodou lze stav bez kavitace očekávat při průtoku jednou (zatopenou) výpustí $Q = 20,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, stav je zaručen při relativním otevření segmentu 0,55. Při větším otevření již lze přibližně očekávat kavitaci. Toto vyjádření meze zatopení a rovněž i hodnotu poměrného průtoku při částečném otevření jsou však velmi orientační a upřesnitelné modelovými zkouškami, pokud nejsou k dispozici zkoušky na konkrétním díle.

Zkoušky na prostorovém hydraulickém modelu lze tedy doporučit i z důvodu zahrnutí výrazného prostorového vlivu levého bočního přítoku z kaskády.

Za předpokladu výměny uzávěrů za doporučený typ a rozměr a při dodržení doporučených manipulačních zásad lze vodní dílo Vranov se současnými výpustěmi bezpečně provozovat v souladu s kapacitními požadavky textové části MŘ.



.....
prof. Ing. Jan Šulc, CSc
odpovědný řešitel
vedoucí ÚVS FAST VUT v Brně

Brno, 15. 5. 2017

6 Literatura

- [1] Manipulační řád pro VD Vranov na řece Dyji v km 175,405, Povodí Moravy, s.p., 03/1983
- [2] Sehnal, J.: Vodní dílo Vranov – Rekonstrukce regulačních uzávěrů spodních výpustí. Souhrnná zpráva, AQUATIS, a.s., září 2016
- [3] Kratochvil, S.: Průtok vody kuželovým (Johnsonovým) uzávěrem. Zprávy veřejné služby technické, Praha, 1938
- [4] Lískovec, L.: Výzkum spodních výpustí přehrad. Práce a studie, VÚVH Praha, 1961, sešit 102
- [5] Kratochvil, S.: Hydraulické vlastnosti vysokotlakých uzávěrů. Výzkumná zpráva, VVÚ VSH VUT v Brně, 1966
- [6] Nehudek, A.; Šulc, J.: Nové poznatky z hydraulického výzkumu prvků k usměrnění proudu za rozstřikovacím uzávěrem. Czech Journal of Civil Engineering, 2/2016, str. 110 – 115, ISSN 2336-7148
- [7] ŠULC, J.: Shaping the outflow jet of tainter gates and hollow cone valves directed into water tunnels. Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 29, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden, 2005, str. 45 – 54, ISSN 0949-5061
- [8] Kratochvil, S.: Měření na betonové přehradě. Technicko – vědecké nakladatelství Praha, 1951
- [9] Říha, J.: Hydraulické řešení přechodového úseku odpadní štoly za segmentovými uzávěry spodních výpustí VD Souš. Diplomová práce, FAST VUT v Brně, 2001
- [10] Galperin R. S. a kol.: Kavitacija na gidrosooruzenijach. Energija, Moskva, 1977
- [11] Žajdlík, M.: Výskum kavitácie uzáverov v obtokoch plavebnej komory stupňa Gabčíkovo. Výzkumná zpráva, VÚVH Bratislava, 1983
- [12] Krejčí, J.: Komplexní prohlídka uzávěrů spodních výpustí VD Vranov. Zpráva, Vodní díla – TBD a.s., Praha, duben 2016
- [13] Žajdlík, M.: Kavitačné a hydrodynamické charakteristiky kuželových uzáverov. Výzkumná zpráva, VÚVH Bratislava, 1970
- [14] Čábelka, J.; Gabriel, P.: Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice. ACADEMIA Praha, 1987
- [15] Šafář, R.; Šulc, J.: Experimentální výzkum přepadu přes přeliv s kruhově zaoblenou korunou. Vodní hospodářství 7/2012, str. 236 – 241