



**České vysoké učení technické v Praze**  
Stavební fakulta

---

Studentská vědecká a odborná činnost  
Akademický rok 2011/2012

## POSOUZENÍ NAMÁHÁNÍ DNA VÝVARU VD HVĚZDA

Assessment of the buffer stock's stress below the waterworks Hvezda

Jméno a příjmení studenta:

ročník, obor:

Vedoucí práce:

Katedra / Ústav:

Pavel Kratochvíl

1. ročník magisterský, V

Ing. Martin Králík, Ph.D.

katedra hydrotechniky

## Obsah

Abstrakt .....	1
Abstract .....	2
1. Úvod .....	2
2. Základní údaje .....	2
2.1.    Identifikační údaje stavby .....	2
2.2.    Hydrologické údaje .....	3
3. Výzkum v laboratoři .....	4
3.1.    Popis modelu .....	4
3.2.    Měřené veličiny .....	5
4. Zpracování výsledků .....	6
4.1.    Měření rychlostí a posouzení namáhání prahu vývaru .....	6
4.2.    Měření tlaků a posouzení namáhání dna vývaru .....	12
5. Závěr .....	18
6. Literatura .....	18

## Abstrakt

Tato práce řeší posouzení spolehlivosti částí konstrukce vodního díla Hvězda. VD Hvězda je hydraulicky komplikovaný sdružený objekt. Sdružuje funkci spodních výpustí, bezpečnostního přelivu a nátoky na malou vodní elektrárnu. K jeho rekonstrukci došlo po více než 600 letech provozu, kdy za povodně v r. 1997 hrozilo poškozením majetku i ztrátám na životech pod ním. Protože teoretický výpočet proudění za různých stavů je zde zatížen řadou chyb, bylo třeba je eliminovat hydrotechnickým výzkumem.

Během výzkumu, který se primárně zabýval ověřením kapacity, a který není předmětem této práce, vzešel též podnět prozkoumat též dynamické účinky vody padající od nově navržené přelivné hrany do vývaru. Toto zvýšené množství vody (oproti stávajícímu stavu) by mohlo mít nepředpokládaný vliv především na desku a příčný práh vývaru. Výsledkem bylo měření parametrů proudící vody. Výstupem je posouzení namáhání a odhad doby životnosti konstrukce.

## **Abstract**

This thesis deals with assessment of the reliability of the structural parts of the waterworks (WW) Hvezda. WW Hvezda is a hydraulically complex clustered object. It brings together the functions of bottom outlets, a security overflow and an inflow into the small water power plant. Its reconstruction took place after 600 years of operation, when the flood of 1997 threatened to damage property and loss of life underneath. Since the theoretical calculation of flow in different states is burdened with a number of inaccuracies, it was necessary to eliminate via hydrotechnical research.

During the research, which was primarily focused on checking the capacity, and which is not the goal of this thesis, there came the initiative to examine also the dynamic effect of water falling from the newly designed spillway edge to the buffer stock. This increased amount of water (compared to the current state) could have unanticipated effects particularly on the plate and the threshold of the stock. The input was the measurement of parameters of flowing water. The output is the assessment of the stress and the estimates of the lifetime of the construction.

## **1. Úvod**

Zadání práce zní posoudit bezpečnost VD Hvězda na hydraulickém fyzikálním modelu. Cílem je změření průběhu tlaků ve vývaru a na jejich základě zjistit dynamické namáhání. Druhým úkolem je proměření rychlostního pole na konci vývaru a na základě získaných hodnot zjistit rychlostní pole pro různé varianty úpravy sdruženého objektu.

## **2. Základní údaje**

### **2.1 Identifikační údaje stavby [1]**

Název stavby:	Vodní dílo Hvězda
Tok:	Třebovka a rybník Hvězda
Místo:	kat. území Opatov, Třebovice v Čechách

Okres: Svitavy, Ústí nad Orlicí  
 Kraj: Pardubický  
 Vlastník (původní objekty): Rybářství Litomyšl, s.r.o., Sokolovská 121,  
 570 01 Litomyšl  
 Vlastník (nové objekty): Povodí Labe, s.p., Víta Nejedlého 951,  
 500 03 Hradec Králové

## 2.2 Hydrologické údaje [3]

Základní hydrologické údaje ve smyslu ČSN 75 1400, charakterizující hydrologické poměry toku:

Tok: Třebovka  
 Číslo hydrologického pořadí: 1-02-02-044 a 1-02-02-046  
 Profil: Třebovka – vodočet Třebovice  
 Plocha povodí: 83,58 km<sup>2</sup>  
 Průměrná dlouhodobá roční výška srážek 856 mm  
 Průměrný dlouhodobý roční průtok 0,665 m<sup>3</sup>/s

**Tab. 1:** m-denní průtoky v m<sup>3</sup>/s (II.třída)

m	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q <sub>d</sub>	1,55	1,06	0,811	0,652	0,539	0,446	0,372	0,306	0,246	0,193	0,140	0,086	0,050

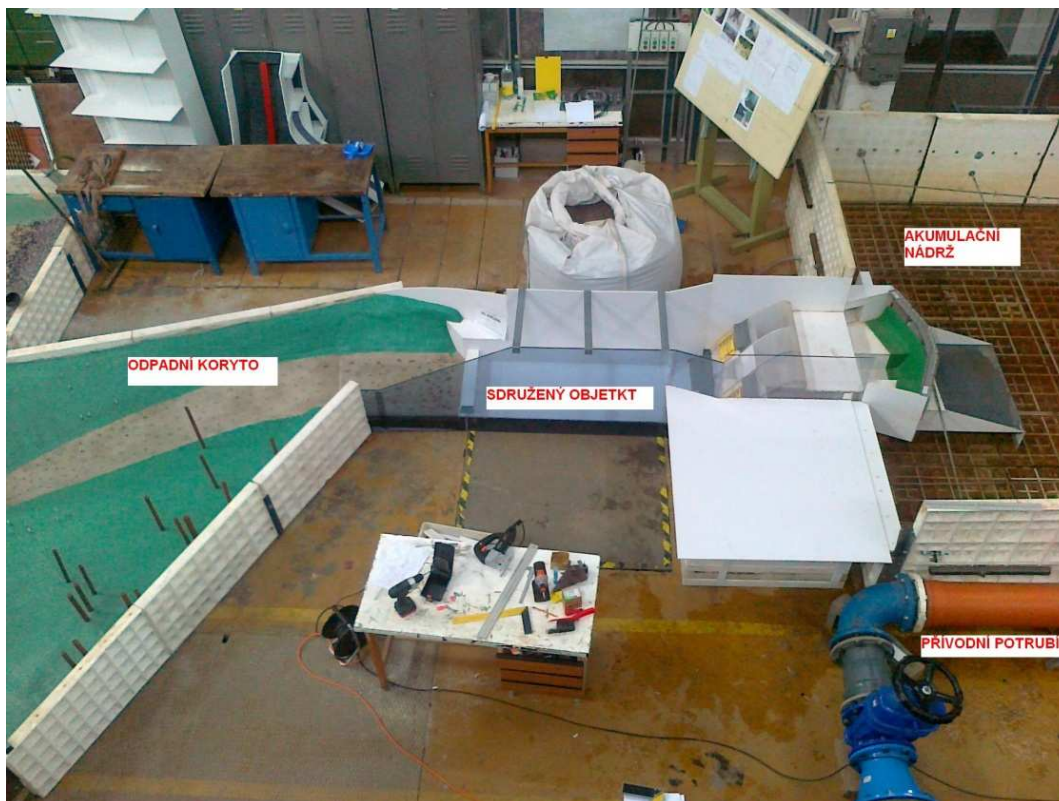
**Tab. 2:** Návrhové průtoky

Měřítko	N (roky)	1	2	5	10	20	50	100	200	
1 : 1	Q (m <sup>3</sup> /s)	5.83	9.56	16.8	24.0	33.1	48.0	62.0	73.3	neovlivněné
1 : 1	Q (m <sup>3</sup> /s)			4.2		13.4	14.9	15.8	30	transformované poldry
1 : 14	Q (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /s)	7.9	13.0	22.9	32.7	45.1	65.5	84.5	100.0	neovlivněné
1 : 14	Q (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /s)			5.7		18.3	20.3	21.5	40.9	transformované poldry

Měřítko	N (roky)	300	500	800	1 000	3 000	5 000	8 000	10 000	
1 : 1	Q (m <sup>3</sup> /s)	84.0	100.0	117.0	127	148	165	187	200	neovlivněné
1 : 1	Q (m <sup>3</sup> /s)	45	60	75	84.5	94	102	113	120	transformované poldry
1 : 14	Q (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /s)	114.5	136.4	159.5	173.2	201.8	225.0	255.0	272.7	neovlivněné
1 : 14	Q (10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /s)	61.4	81.8	102.3	115.2	128.2	139.1	154.1	163.6	transformované poldry

### 3. Výzkum v laboratoři

#### 3.1 Popis modelu [1]



Obr. 1: Hlavní části modelu

Vstupní modelové podmínky u Froudova typu modelové podobnosti jsou vyjádřeny podmínky dynamické podobnosti hydrodynamických jevů za výhradního působení gravitačních sil. Kinematicky podobné jevy, které ovlivňuje výhradně gravitační síla, jsou dynamicky podobné, jestliže ve vzájemně příslušných

průřezech budou stejná Froudova čísla  $Fr = \sqrt{\frac{\alpha v^2}{gy}}$

Na základě geometrické podobnosti se určí měřítko délek  $M_l$ . Toto je určeno na základě mezních podmínek modelové podobnosti, možnostech laboratoře, konstrukčních možnostech a podmínek reprezentativního výzkumu. Zvolené měřítko bylo určeno  $M = 1:14$ . Model sruženého objektu má délku  $L = 3,9$  m, výšku  $H = 0,75$  m a šířku  $B = 1,1$  m. [1]

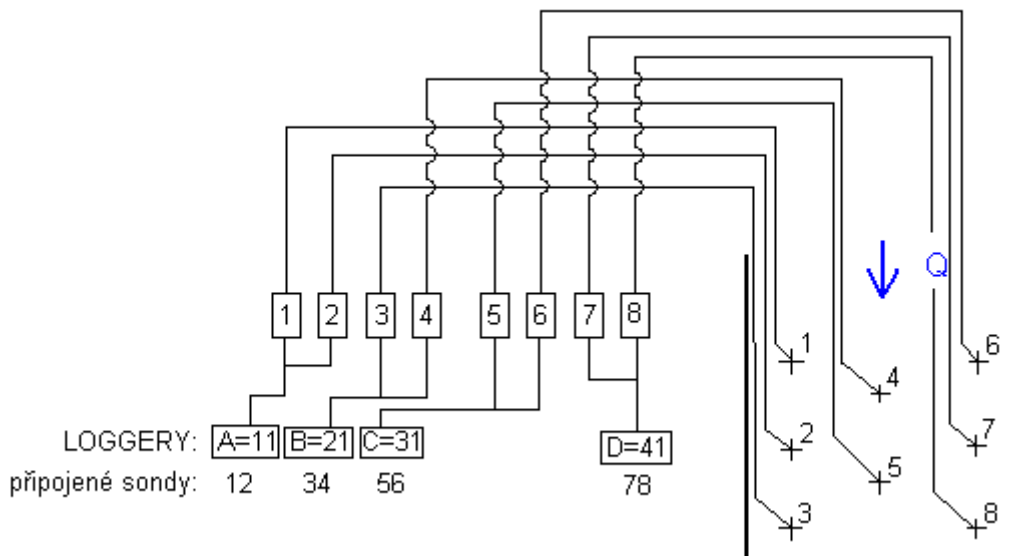
## 3.2 Měřené veličiny

### Měření rychlostí na prahu vývaru:

Rychlosti byly zjišťovány v každé modifikaci pouze pro návrhové průtoky  $Q_{10}$ ,  $Q_{100}$ ,  $Q_{1000}$  a  $Q_{10\,000}$ . Měření bylo prováděno hydrometrickou vrtulkou, umístěvanou do zvolených pozic. Vrtulka je usazena na teleskopickém rameni a přes datový kabel spojena s čítačem, který měří průměrnou rychlost vody za 30 s.

### Měření tlaků na dně vývaru:

Tlaky na dně vývaru byly zjišťovány na 8 místech vývaru. Měření bylo prováděno piezometrickými sondami, které byly na model napojeny gumovými hadičkami, naplněnými vodou. Druhý konec hadiček ústí ve dně vývaru, a se sondami tak tvořil funkční hydraulický okruh. Sondy byly po dvou připojeny na „datalogery“, které převádějí signál ze sond na tlak, který zobrazují a ve zvoleném intervalu (zde  $\Delta t = 10$  s) i zaznamenávají. Napájení dataloggerů je z 9V baterií. Schéma zapojení – viz Obr. 2.



**Obr. 2:** Schéma zapojení soustavy pro měření tlaku

## 4. Zpracování výsledků

### 4.1 Měření rychlostí a posouzení namáhání prahu vývaru

Možný přístup jak interpretovat vliv rychlosti je vyjádřit sílu proudu jako změnu jeho hybnosti. Přepíšeme-li hybnost pomocí rychlosti, dostaneme pro vektor síly proudu:

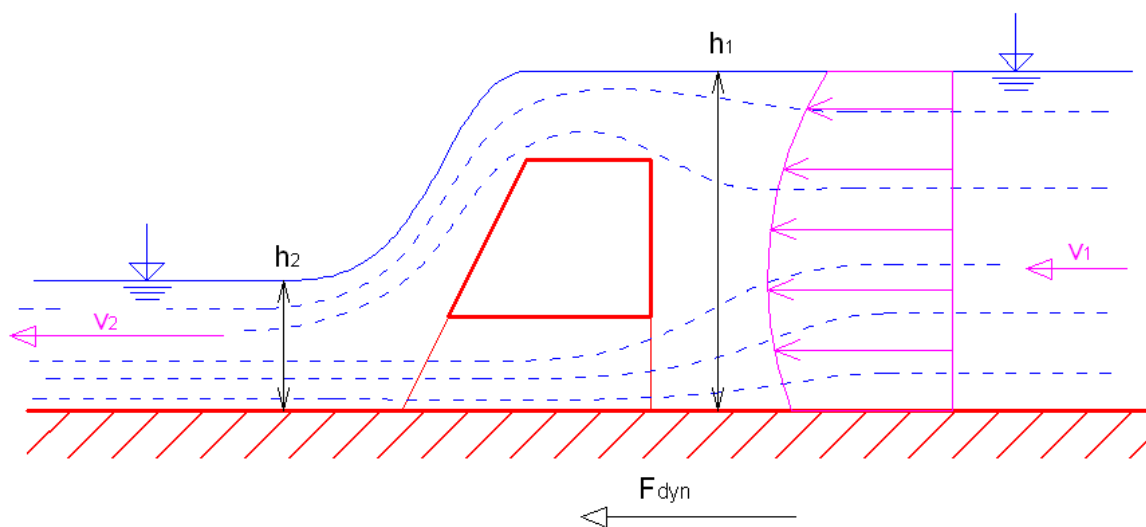
$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \frac{m \cdot \Delta \vec{v}}{\Delta t} = \rho \cdot Q \cdot \Delta \vec{v} = \rho \cdot Q \cdot (\vec{v}_1 - \vec{v}_2) \quad (1)$$

Kde  $p$  je vektor hybnosti proudu

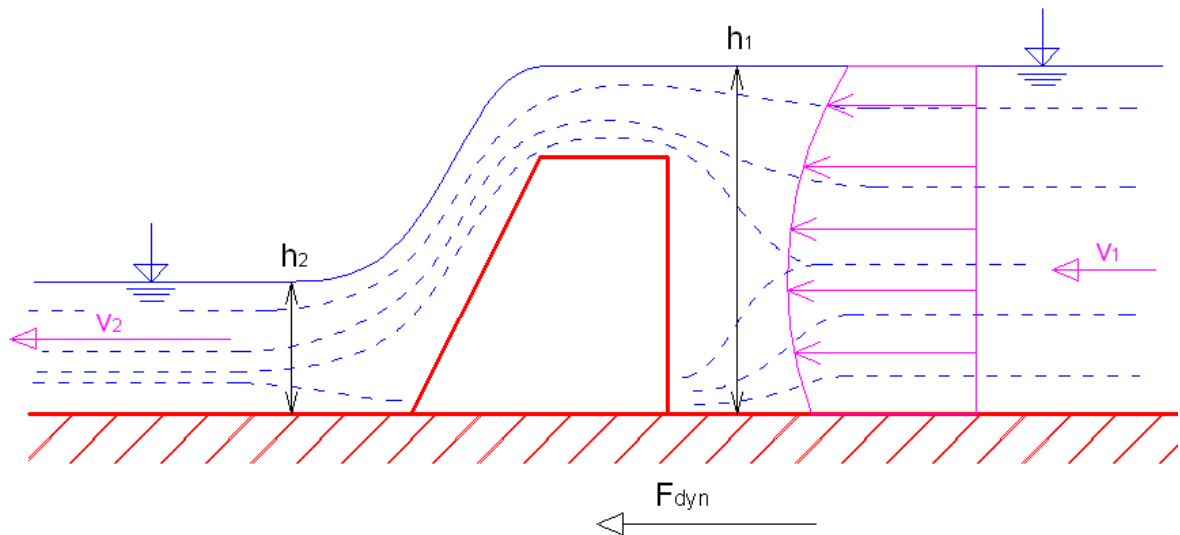
$\rho$  je hustota / objemová tíha kapaliny; pro vodu  $\rho_{\text{voda}} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  (v závislosti na teplotě)

$Q$  je objemový průtok

$\vec{v}_1$  a  $\vec{v}_2$  jsou vektory rychlosti před profilem ( $v_1$ ) a za profilem ( $v_2$ )



**Obr. 3:** Změna průměrné rychlosti před a za prahem vývaru (profil s otvorem:  $B_{\text{otvor}} = 0,75 \text{ m}$ )



**Obr. 4:** Změna průměrné rychlosti před a za prahem vývaru (plný profil:  $B_{\text{plný}} = 0,50 \text{ m}$ )

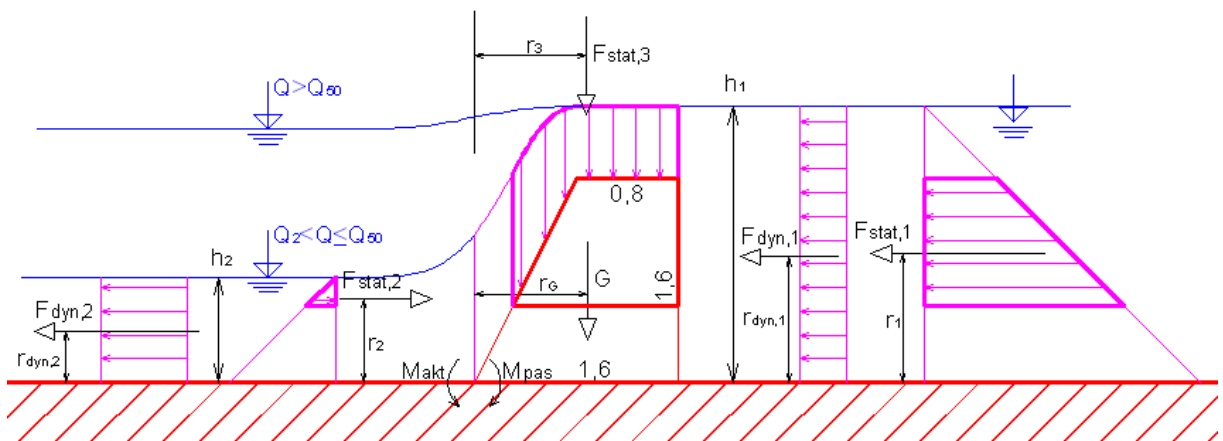
Z měření známe  $v_1$  a  $h_1$ . Hloubka dolní vody  $h_2$  nebyla měřena, ale lze ji alespoň vizuálně odhadnout. K určení  $F_{\text{dyn}}$  potřebujeme  $v_1$  a  $v_2$ . Rychlost  $v_2$  můžeme dopočítat ze změřených hloubek a ze známého průtoku. Pro rychlost v závislosti na průtoku  $Q$  a průtočné ploše  $S$  (se šířkou  $B$ ) platí:

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{B \cdot h} \dots \dots \dots v \sim \frac{1}{h} \dots \dots \dots \frac{v_2}{v_1} \sim \frac{\frac{1}{h_2}}{\frac{1}{h_1}} = \frac{h_1}{h_2} \quad (2)$$

Potom: 
$$v_2 = \frac{v_2}{v_1} \cdot v_1 = \frac{h_1}{h_2} \cdot v_1 \quad (3)$$

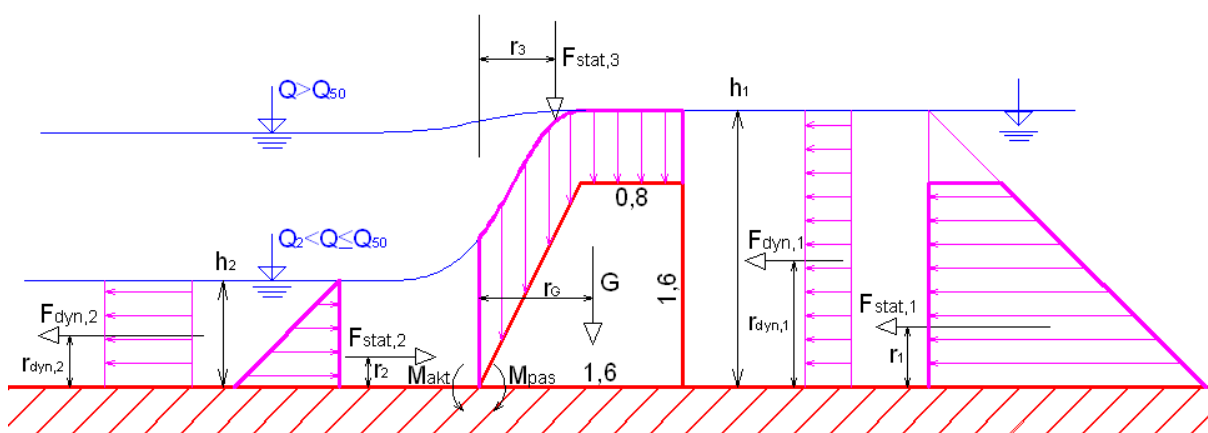
**Síly na práh vývaru:**

Síly budou v obecném případě rozděleny jako na Obr. 5, 6 a budou mít tvar:





**Obr. 5:** Síly na práh vývaru (profil s otvorem:  $B_{\text{otvor}} = 0,75 \text{ m}$ )



**Obr. 6:** Síly na práh vývaru (plný profil:  $B_{\text{plný}} = 0,50 \text{ m}$ )

$$\text{Plný profil: } \omega_{stat,1} = \frac{1}{2} \cdot h_1^2 - \frac{1}{2} \cdot (h_1 - 1,6)^2 = 1,6 \cdot h_1 - 1,28 \text{ [m}^2\text{]} \quad (4)$$

$$\text{Profil s otvorem: } \omega_{stat,1} = \frac{1}{2} \cdot (h_1 - 0,6)^2 - \frac{1}{2} \cdot (h_1 - 1,6)^2 = h_1 - 1,1 \text{ [m}^2\text{]} \quad (5)$$

$$F_{stat,1} = \omega_{stat,1} \cdot \rho \cdot g \cdot B = \omega_{stat,1} \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 8 = \omega_{stat,1} \cdot 78480 \text{ [N]} \quad (5)$$

$$\text{Plný profil: } r_1 (h_1 \geq 1,6) = \frac{1,28 \cdot h_1 - \frac{512}{375}}{1,6 \cdot h_1 - 1,28} \text{ [m]} \quad (6)$$

$$\text{Profil s otvorem: } r_1 (h_1 \geq 1,6) = 0,6 + \frac{\frac{1}{6}(h_1 - 0,6)^3 - \frac{1}{2}(h_1 - 1,6)^2 - \frac{1}{6}(h_1 - 1,6)^3}{\omega_1} \text{ [m]} \quad (7)$$

$$\text{Plný profil: } \omega_{stat,2} = \frac{1}{2} \cdot h_2^2 \text{ [m}^2\text{]} \quad (8)$$

$$\text{Profil s otvorem: } \omega_{stat,2} (h_2 \geq 0,6) = \frac{1}{2} \cdot (h_2 - 0,6)^2 \text{ [m}^2\text{]} \quad (9)$$

$$F_{stat,2} = \omega_{stat,2} \cdot \rho \cdot g \cdot B = \omega_{stat,2} \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 8 = \omega_{stat,2} \cdot 78480 \text{ [N]} \quad (10)$$

$$\text{Plný profil: } r_2 = \frac{1}{3} \cdot h_2 \text{ [m]} \quad (11)$$

$$\text{Profil s otvorem: } r_2 = 0,6 + \frac{1}{3} (h_2 - 0,6) \quad (12)$$

$$\text{Plný profil: } \omega_{stat,3} (Q_2 < Q \leq Q_{50}) \cong 1,6 \cdot (h_1 - 1,6) \text{ [m}^2\text{]} \quad (13)$$

$$\text{Profil s otvorem: } \omega_{stat,3}(Q > Q_{50}) \cong 1,6 \cdot (h_1 - 1,6) + \frac{1}{2} \cdot 1,6 \cdot 0,8 [m^2] \quad (14)$$

$$\text{Plný profil: } \omega_{stat,3}(Q_2 < Q \leq Q_{50}) \cong 1,3 \cdot (h_1 - 1,6) [m^2] \quad (15)$$

$$\text{Profil s otvorem: } \omega_{stat,3}(Q > Q_{50}) \cong 1,3 \cdot (h_1 - 1,6) + \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 0,5 [m^2] \quad (16)$$

$$F_{stat,3} = p_{stat,3} \cdot 78480 [N] \quad (17)$$

$$\text{Plný profil: } r_3 \cong \frac{1,6}{2} = 0,8 m \quad (18)$$

$$\text{Profil s otvorem: } r_3 \cong 0,3 + \frac{1,3}{2} = 0,95 m \quad (19)$$

$$F_{dyn,1} = \rho \cdot Q \cdot v_1 [N]; F_{dyn,2} = \rho \cdot Q \cdot v_2 [N]; r_{dyn,1} = \frac{h_1}{2} [m]; r_{dyn,2} = \frac{h_2}{2} [m] \quad (20)$$

$$F_{dyn} = \rho \cdot Q \cdot (v_1 - v_2) [N] \quad (21)$$

$$\Sigma F_x = F_{stat,1} - F_{stat,2} + F_{dyn} [N] \quad (22)$$

$$\Sigma F_y = F_{stat,3} + G [N] \quad (23)$$

$$M_{akt} = F_{stat,1} \cdot r_1 + F_{dyn,1} \cdot r_{dyn,1} + F_{dyn,2} \cdot r_{dyn,2} [Nm] \quad (24)$$

$$M_{pas} = F_{stat,2} \cdot r_2 + F_{stat,3} \cdot r_3 + G \cdot t_g [Nm] \quad (25)$$

$$M = M_{akt} - M_{pas} [Nm] \quad (26)$$

## Posuzování:

### 1) Napětí ve spáře od smyku [5]

Uvažuji monolitický beton bez smykové výztuže. Na práh působí vodorovné síly, kterým odolává beton ve spáře mezi prahem a deskou svým smykovým napětím (viz Obr. 40). Návrhová pevnost betonu ve smyku je

$$\tau_{Rd} = \frac{0,25 \cdot f_{ct,k 0,05}}{\gamma_c} \quad (27)$$

Kde  $f_{ct,k 0,05}$  je charakteristická pevnost betonu v tahu (s 5% pravděpodobností překročení); pro beton C16/20 je  $f_{ct,k 0,05} = 1,5 \text{ MPa}$

$\gamma_c = 1,5$  součinitel bezpečnosti

Pro beton C16/20 je  $\tau_{Rd} = 0,25 \text{ MPa}$

Návrhovou pevnost porovnávám se smykovým napětím:

$$\tau = \frac{\sum F_x}{S} = \frac{F_{stat,1} - F_{stat,2} + F_{dyn}}{1,6 \cdot 8} \text{ [Pa]} \quad (28)$$

Faktor zabezpečení je pak  $F = \frac{\tau_{Rd}}{\tau}$ . Pro stabilitu konstrukce je nutno  $SF > 1$ .

## 2) Napětí ve spáře od překlopení

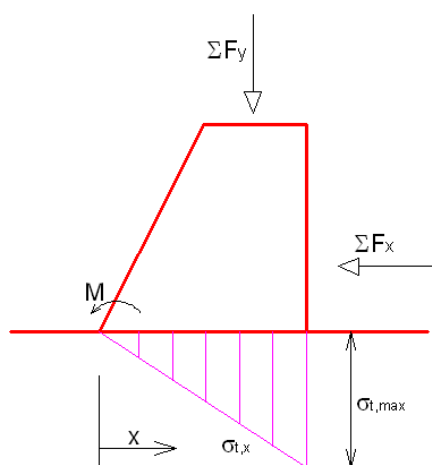
Uvažuji monolitický beton bez tahové výztuže. Maximální napětí bude na vzdálenější hraně, a zjistím jej z momentové rovnováhy [Nm]:

$$M = \int_{x=0}^{1,6} \sigma_t(x) \cdot x \, dx = \int_{x=0}^{1,6} \frac{\sigma_{t,max}}{1,6} \cdot x \cdot x \, dx = \frac{\sigma_{t,max}}{1,6} \cdot \frac{|x^3|_{x=0}^{1,6}}{3} = \sigma_{t,max} \cdot \frac{1,6^2}{3}$$

$$\sigma_{t,max} = \frac{3}{1,6^2} \cdot M \text{ [Pa]} \quad (29)$$

Napětí pak porovnávám s návrhovou pevností betonu v tahu  $f_{ct,k 0,05} = 1,5 \text{ MPa}$ .

Faktor zabezpečení pak zavádím jako  $F = \frac{f_{ct,k 0,05}}{\sigma_{t,max}}$ . Pro stabilitu konstrukce je nutno  $SF > 1$ .



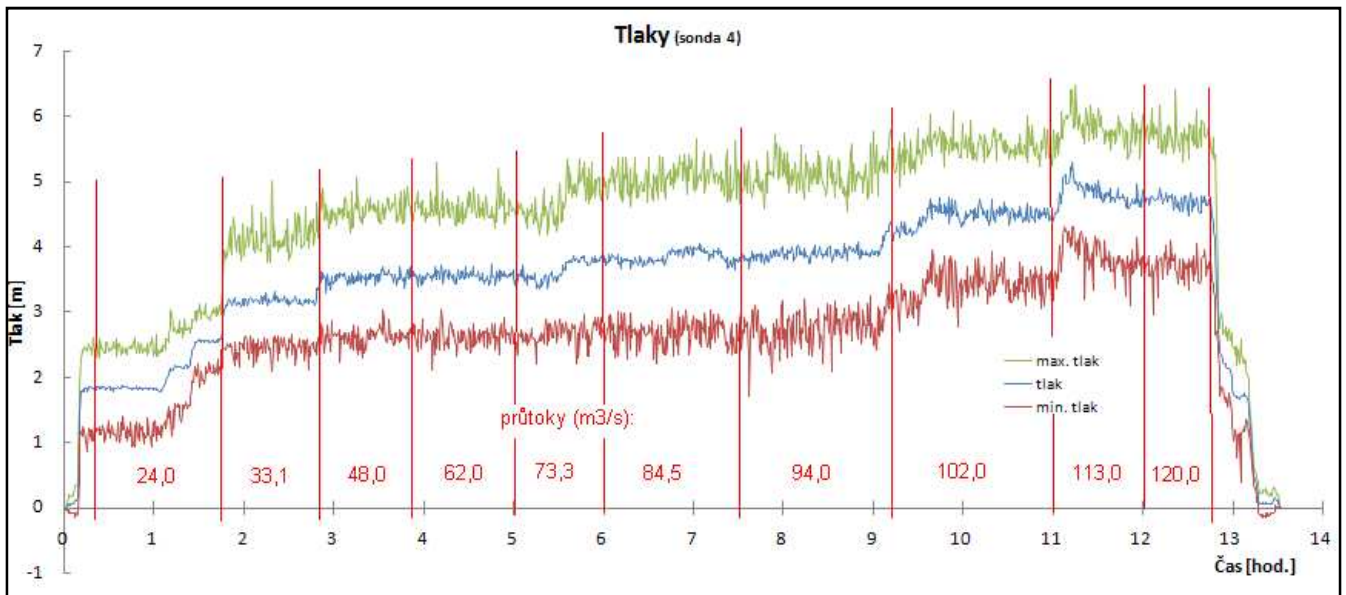
**Obr. 7:** Napětí od klopení ve spáře

**Tab. 3:** Parametry posouzení prahu vývaru

zatížení		Q							
		Q <sub>10</sub>	Q <sub>100</sub>	Q <sub>1000</sub>	Q <sub>10000</sub>				
posouzení	zatížení	měřeno	Q	[m <sup>3</sup> /s]	24	62	84,5	120	
			Ø h <sub>1</sub>	[m]	2,3	3,32	3,57	4,11	
h <sub>2</sub>			[m]	0,8	1,2	1,4	1,8		
Ø v <sub>1</sub>			[m/s]	2,97	4,05	4,63	5,17		
v <sub>2</sub>			[m/s]	8,54	11,21	11,81	11,80		
monolit		spočítání	horní v.	ω <sub>stat,1</sub>	[m]				
				F <sub>stat,1</sub>	[N]	21 337	36 846	40 648	48 859
			dolní v.,	r <sub>1</sub>	[m]				
				ω <sub>stat,2</sub>	[m]				
			přepad	F <sub>stat,2</sub>	[N]	1 717	4 856	7 161	13 244
	r <sub>2</sub>	[m]							
	ω <sub>stat,3</sub> (Q <sub>2</sub> < Q ≤ Q <sub>50</sub> )	[m]							
	ω <sub>stat,3</sub> (Q > Q <sub>50</sub> )	[m]							
	F <sub>stat,3</sub>	[N]		12 189	34 929	39 282	48 685		
	dynamika	r <sub>3</sub> (Q <sub>2</sub> < Q ≤ Q <sub>50</sub> )	[m]						
r <sub>3</sub> (Q > Q <sub>50</sub> )		[m]							
F <sub>dyn,1</sub>		[N]	11 138	39 234	61 130	96 938			
F <sub>dyn,2</sub>		[N]	32 020	108 548	155 883	221 341			
F <sub>dyn</sub>		[N]	-20 883	-69 314	-94 752	-124 403			
tíha	r <sub>dyn,1</sub>	[m]							
	r <sub>dyn,2</sub>	[m]							
	G	[N]	31 002	31 002	31 002	31 002			
	r <sub>G</sub>	[m]							
	ΣFx	[N]	-1 263	-37 324	-61 266	-88 788			
superpozice	ΣFy	[N]	43 190	65 930	70 283	79 686			
	M <sub>akt</sub>	[Nm]	42 900	162 201	253 771	441 709			
	M <sub>pas</sub>	[Nm]	43 199	62 522	68 175	82 253			
	M	[Nm]	-299	99 679	185 597	359 456			
	τ	[Pa]	-282	-35 886	-59 792	-87 211			
tah	smyk	τ <sub>Rd</sub>	[Pa]	250 000	250 000	250 000	250 000		
		SF		887	7	4	3		
posouzení	monolit	tah	σ <sub>t,max</sub> (M < 0)	[Pa]	-350				
			σ <sub>t,max</sub> (M ≥ 0)	[Pa]		116 811	217 496	421 238	
			f <sub>ct,k 0.05</sub>	[Pa]	1 500 000	1 500 000	1 500 000	1 500 000	
			SF (M ≥ 0)			13	6,9	3,6	

## 4.2 Měření tlaků a posouzení namáhání dna vývaru

Údaje o tlacích byly sbírány během 1 měření, kdy se po každém úseku změnil průtok:



**Obr. 8:** Změna tlaků v průběhu měření

Pro posouzení betonu v tlaku nabízí ČSN EN 1992-1-1, resp. EN 1992-2, dvě metody. Podle první, modifikované v EN 1992-2 se posouzení betonu v tlaku na únavu provádí pomocí Palmgren-Minerova pravidla... **Počet cyklů napětí, jež vyvodí únavové poškození, se stanoví z výrazu [4 – str. 10]:**

$$N_i = 10 \cdot \exp\left(14 \cdot \frac{1 - E_{cd,max,i}}{\sqrt{1 - R_i}}\right) \quad [4 - \text{str. } 10] \quad (30)$$

Kde  $R_i = \frac{E_{cd,min,i}}{E_{cd,max,i}}$  je poměr napětí

$E_{cd,min,i} = \frac{\sigma_{cd,min,i}}{f_{cd,fat}}$  je minimální úroveň tlakového namáhání

$E_{cd,max,i} = \frac{\sigma_{cd,max,i}}{f_{cd,fat}}$  je maximální úroveň tlakového namáhání

$\sigma_{cd,min,i}$  je dolní napětí v zatěžovacím cyklu

$\sigma_{cd,max,i}$  je horní napětí v zatěžovacím cyklu

$f_{cd,fat} = 0,85 \cdot \beta_{cc}(t_0) \cdot f_{cd} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$  je návrhová hodnota pevnosti betonu; součinitel  $\beta_{cc}$  vyjadřuje vliv stáří betonu při jeho prvním zatížení v čase  $t_0$ .

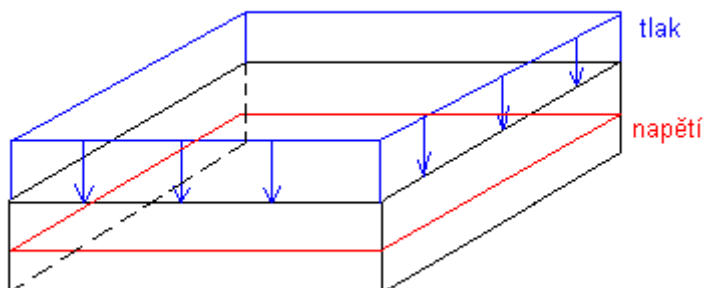
Zdroj: [4 – str. 10]

Při náhradě návrhové pevnosti betonu v čase charakteristickou pevností, a při dosazení výrazů do vzorce, dostaneme:

$$\begin{aligned} \underline{\underline{N_i}} &= 10 \cdot \exp\left(14 \cdot \frac{1 - E_{cd,max,i}}{\sqrt{1 - R_i}}\right) = 10 \cdot \exp\left(14 \cdot \frac{1 - \frac{\sigma_{cd,max,i}}{f_{cd,fat}}}{\sqrt{1 - \frac{\frac{\sigma_{cd,min,i}}{f_{cd,fat}}}{1 - \frac{\sigma_{cd,max,i}}{f_{cd,fat}}}}}\right) \\ &= 10 \cdot \exp\left(14 \cdot \frac{1 - \frac{\sigma_{cd,max,i}}{f_{cd,fat}}}{\sqrt{1 - \frac{\sigma_{cd,min,i}}{\sigma_{cd,max,i}}}}\right) \stackrel{\text{ozn.}}{=} 10 \cdot \exp\left(14 \cdot \frac{1 - \frac{\sigma_{max}}{f}}{\sqrt{1 - \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}}}\right) \end{aligned}$$

U obou amplitud zatěžovacího cyklu ( $\sigma_{min}$  a  $\sigma_{max}$ ) se předpokládá zatížení tlakem.

Moje úvaha byla, že do vzorce pro  $N$  budu za amplitudy zatížení dosazovat přímo změřené tlaky. Tato úvaha vycházela z představy, že deska je masivní těleso, které je zatěžováno shora přibližně rovnoměrně, a toto zatížení vyvolává v materiálu tlak, který musí být vzhledem k rozměrům desky identický s vnějším zatížením; jde o tlačný průřez – viz Obr. 9:



**Obr. 9:** Napětí v desce volně uložené na tuhém podkladu

### Zjištění frekvence:

Pro přesnější měření byl opatřen nový převodník, který umožňuje zaznamenávat průběh tlaku s frekvencí až 1000 Hz. Při měření s časovým krokem právě 0,001 s (viz graf 5b) byla zjištěna frekvence kmitů  $f_{model} = 5 \text{ Hz}$ ; potom

$$f_{reál} = \frac{f_{model}}{\sqrt{14}} = \frac{5}{\sqrt{14}} = 1,3 \text{ Hz} \quad (31)$$

### Nahrazení náhodného zatěžování periodickým pohybem:

Nabízí se několik způsobů, jak náhodný pohyb charakterizovat 2 hodnotami, které simulují amplitudy periodického pohybu; např. x-procentní horní, resp. dolní kvantil min., resp. max. tlaků. Protože není zřejmé, který kvantil bychom měli použít, zvolil jsem průměry z min. a max. tlaku:

$$\sigma_{min} = \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n \text{min. tlak}_i \quad (32)$$

$$\sigma_{max} = \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n \text{max. tlak}_i \quad (33)$$

### Výpočet namáhání:

Chceme-li odpovědět na otázku kolik povodní, resp. kontrolních povodňových vln (KPV), stavba přečká, než dojde k porušení její pevnosti únavou materiálu, musíme znát také průběh povodně. Ve vzorci pro počet cyklů  $N$  se totiž vyskytuje jen min. a max. napětí, které je přímo úměrné vnějšímu tlakovému zatížení. Toto zatížení se ale s průtokem mění. Povodňová vlna je charakterizována časovým průběhem průtoku ve zkoumaném profilu – hydrogramem.

V rámci zachování únosné složitosti úlohy jsem vlnu rozdělval na různý počet úseků (viz obr. 10). Každý takový úsek jsem pak charakterizoval konstantním průtokem, pro který jsem z měření tlaků odečetl tlaky:

**Tab. 4:** Výpočet namáhání --- pevnost 20 MPa --- frekvence 1,3 Hz

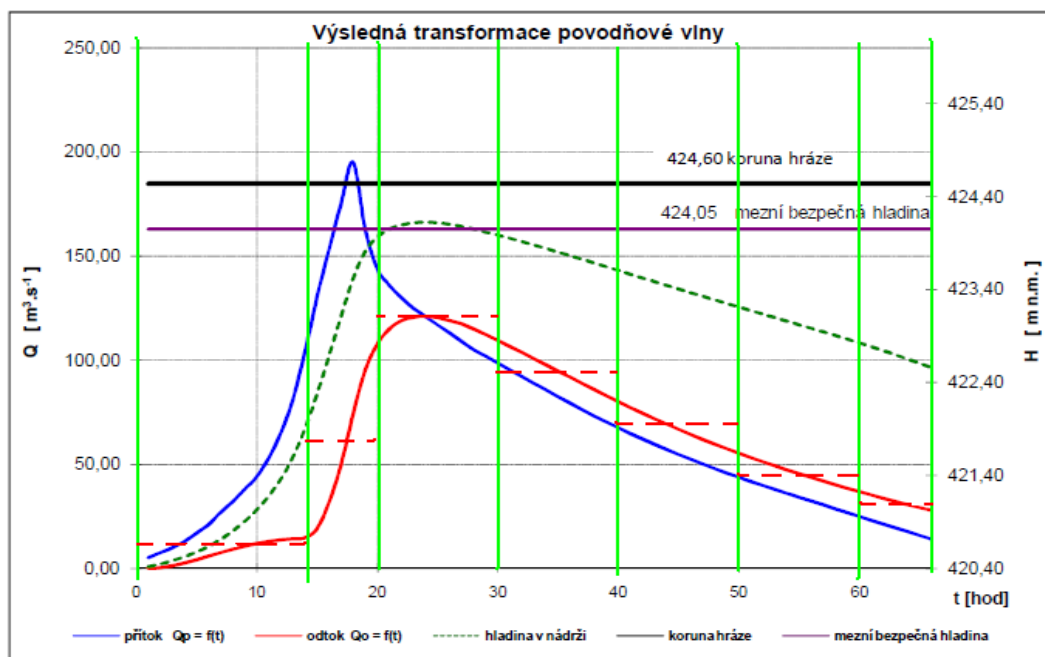
rozdělení KPV na # úseků	trvání od (h)	trvání do (h)	průtok z KPV (m <sup>3</sup> /s)	son da č.	σ min (MPa)	σ max (MPa)	N = počet cyklů do porušení (# cyklů)	počet cyklů v intervalu (# cyklů)	míra poškození (-)	celková míra poškození (-)	počet PV do porušení
1	0	65	121,1	7	0,015	0,042	3,82E+08	3,04E+05	7,96E-04	7,96E-04	<b>1256</b>
3	0	15	17	4	0,013	0,025	5,72E+09	7,02E+04	1,23E-05		
	15	30	120	7	0,015	0,042	3,82E+08	7,02E+04	1,84E-04		
	30	65	110	7	0,017	0,040	9,70E+08	1,64E+05	1,69E-04	3,65E-04	<b>2740</b>
7	0	15	15	4	0,013	0,025	5,72E+09	7,02E+04	1,23E-05		
	15	20	64	7	0,020	0,040	4,83E+09	2,34E+04	4,84E-06		
	20	30	120	7	0,015	0,042	3,82E+08	4,68E+04	1,23E-04		
	30	40	90	5	0,017	0,048	3,65E+08	4,68E+04	1,28E-04		
	40	50	67	7	0,020	0,040	4,83E+09	4,68E+04	9,69E-06		
	50	60	40	7	0,020	0,039	4,24E+09	4,68E+04	1,10E-05		
	60	65	35	7	0,020	0,037	9,82E+09	2,34E+04	2,38E-06	2,91E-04	<b>3435</b>

$$\text{skutečný počet cyklů v intervalu} = \text{trvání (hod.)} \cdot 3600 \left(\frac{s}{\text{hod.}}\right) \cdot \text{frekvence} \left(\frac{\text{kmitů}}{s}\right) \quad (34)$$

$$\text{míra poškození} = \frac{\text{počet cyklů v intervalu}}{\text{počet cyklů do porušení}} \quad (35)$$

$$\text{celková míra poškození} = \sum_{\text{trvání PV}} \text{míra poškození} \quad (36)$$

$$\text{počet PV do porušení} = \frac{1}{\text{celková míra poškození}} \quad (37)$$



**Obr. 10:** Nahrazení hydrogramu skokovým průběhem průtoku [2]



Dále jsem chtěl tento údaj převést na životnost konstrukce v vyjádřenou letech. Vyšel jsem z následující úvahy pro 10-leté období:

Počet výskytů  $Q_{10}$  během  $R$  roků označím  $x(Q_{10}) = \frac{R}{10} = \frac{10}{10} = 1$ . Potom

počet výskytů / překročení  $Q_5$  během  $R$  roků bude  $x(Q_5) = \frac{R}{5} - x(Q_{10}) = \frac{R}{5} - \frac{R}{10} = \frac{10}{5} - \frac{10}{10} = 2 - 1 = 1$ .

Počet výskytů / překročení  $Q_2$  během  $R$  roků pak je  $x(Q_2) = \frac{R}{2} - x(Q_{10}) - x(Q_5) = \frac{R}{2} - x(Q_{10}) - \left(\frac{R}{5} - x(Q_{10})\right) = \frac{R}{2} - \frac{R}{5} = \frac{10}{2} - \frac{10}{5} = 5 - 2 = 3$ .

Nakonec počet výskytů / překročení  $Q_1$  během  $R$  roků pak je  $x(Q_1) = \frac{R}{1} - x(Q_2) - x(Q_5) - x(Q_{10}) = \frac{R}{1} - \left(\frac{R}{2} - \frac{R}{5}\right) - \left(\frac{R}{5} - \frac{R}{10}\right) - \frac{R}{10} = \frac{R}{1} - \frac{R}{2} = \frac{10}{1} - \frac{10}{2} = 10 - 5 = 5$ .

Obecně pro počet výskytů/překročení  $N$ -leté povodně platí:

$$x(Q_N) = \frac{R}{N} - \frac{R}{\{N+1\}} \quad (38)$$

kde  $\{N + 1\}$  je další člen řady návrhových  $N$ -letostí  $\{1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200; \dots\}$ .

Celkový názor si lze udělat z Tab. 5. Její význam ukažme na příkladu 10-letého intervalu.

- V něm se vyskytne:
- 1 PV s kulminací 24 m<sup>3</sup>/s (=  $Q_{10}$ )
  - 1 PV s kulminací 16,8 m<sup>3</sup>/s (=  $Q_5$ )
  - 1 PV s kulminací 9,56 m<sup>3</sup>/s (=  $Q_2$ )
  - 2 PV s 5,83 m<sup>3</sup>/s (=  $Q_1$ ) < kulminací < 9,56 m<sup>3</sup>/s (=  $Q_2$ )
  - 1 PV s kulminací 5,83 m<sup>3</sup>/s (=  $Q_1$ )
  - 4 PV s kulminací < 5,83 m<sup>3</sup>/s (=  $Q_1$ )

**Tab. 5:** Počty max. ročních povodní během  $R$  roků, které jsou  $\geq Q_N$

R (roky)	Q1	Q2	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q200
1	1							
2	1	1						
5	2,5	1,5	1					
10	5	3	1	1				
20	10	6	2	1	1			
50	25	15	5	2,5	1,5	1		
100	50	30	10	5	3	1	1	
200	100	60	20	10	6	2	1	1

## Životnost konstrukce:

Výsledná životnost stavby byla zkoumaná na většinu návrhových PV. Doba trvání by se musela určit přesněji; zde jsem použil pro všechny dobu trvání shodnou s  $KPV_{10\,000}$ , tj. 65 hod. Počet událostí do porušení je identický s nejmenším počtem událostí ze všech 8 sond. Číselné řešení – viz Tab. 6 a 7.

**Tab. 6:** Životnost konstrukce ( $Q_2 = 9,56 \text{ m}^3/\text{s}$ )

sonda č.	$\sigma$ min (MPa)	$\sigma$ max (MPa)	N (do porušení) (# cyklů)	skutečný počet cyklů v 1 události (# cyklů)	počet událostí do porušení	životnost (# roků)
1	0,010	0,020	4,68E+09	3,04E+05	15376	<b>28894</b>
2	0,005	0,006	6,48E+30	3,04E+05	2,13E+25	
3	0,012	0,017	3,33E+12	3,04E+05	10951782	
4	0,011	0,017	1,43E+11	3,04E+05	468728	
5	0,010	0,014	5,04E+11	3,04E+05	1656769	
6	0,008	0,017	2,64E+09	3,04E+05	8668	
7	0,007	0,015	2,60E+09	3,04E+05	8549	
8	0,010	0,013	3,83E+13	3,04E+05	125910823	

**Tab. 7:** Životnost konstrukce ( $Q_5 = 16,8 \text{ m}^3/\text{s}$ )

sonda č.	$\sigma$ min (MPa)	$\sigma$ max (MPa)	N (do porušení) (# cyklů)	skutečný počet cyklů v 1 události (# cyklů)	počet událostí do porušení	životnost (# roků)
1	0,013	0,022	2,91E+10	3,04E+05	95740	<b>38281</b>
2	0,011	0,011	1,61E+51	3,04E+05	5,28E+45	
3	0,014	0,022	1,05E+11	3,04E+05	345158	
4	0,010	0,024	1,16E+09	3,04E+05	3828	
5	0,014	0,021	4,71E+11	3,04E+05	1549456	
6	0,014	0,024	2,17E+10	3,04E+05	71329	
7	0,011	0,022	2,23E+09	3,04E+05	7338	
8	0,014	0,020	8,74E+12	3,04E+05	28726147	

## 5. Závěr

Vyhodnocením měření rychlostního pole na prahu vývaru modelu VD Hvězda bylo zjištěno jeho silové namáhání od proudící vody. **Konstrukce svou pevností vyhoví**, a to i při zjednodušujícím předpokladu zanedbání působení smykové výztuže.

Vyhodnocením měření tlakových pulzací na dně vývaru modelu VD Hvězda bylo zjištěno jeho silové namáhání od proudící vody. Z něj byla odvozena **životnost konstrukce v letech: 28 894 let**.

## 6. Literatura

- [1] Ing. Martin Králík, Ph.D. a kol, k 142). *Fyzikální hydraulický model VD Hvězda - Modelový výzkum pro ověření kapacity bezpečnostního přelivu*. ČVUT, prosinec 2008.
- [2] Vodní díla – TBD a.s. *Vodní dílo Hvězda – Posudek bezpečnosti za povodní (k. ú. Třebovice, Pardubický kraj, tok Třebovka)*. Praha, říjen 2009.
- [3] Ing. Filip Kysnar. Hydroprojekt CZ a.s. *Manipulační řád pro Rybník Hvězda*. Praha, říjen 2005.
- [4] Marek Foglar. *Pomůcka ke cvičení(m) předmětů BEM1 a BEM2*. ČVUT, únor 2011
- [5] Prof. Ing. Milan Holický, DrSc. *Smyk. Kloknerův ústav ČVUT*, duben 2011