

Tlumení kinetické energie při přímém plnění plavební komory

Dissipation kinetic energy of the direct filling in navigation locks

Tomáš Kašpar

1 Anotace

Článek se zabývá optimalizací vzpěrných vrat pro přímé plnění velké části plavební komory Děčín. Motivace výzkumu vyplývá ze snahy zajištění spolehlivé funkce plavební komory v havarijním režimu. Pozornost byla zaměřena na možnosti optimalizace tlumení kinetické energie pod vraty velké plavební komory, a to zejména optimalizací návrhu polohy uzávěru a úpravou provozní manipulace nastavením rychlosti otvírání uzávěru v rámci rezervního systému plnění při otvírání vrat.

Klíčová slova: fyzikální výzkum, plavební komora, vzpěrná vrata, přímé plnění, tlumení kinetické energie

2 Annotation

The article deals with an optimization of the strutting gate with the direct filling of the large of the Děčín lock. The research motivation emerges from the effort to ensure the reliable operation of the chambers in an emergency mode. Attention was focused on the possibilities of optimization of damping kinetic energy under a lock gate, especially by adjusting of a filling jets and by adjusting of operational manipulation of gate valve by adjusting of opening speed within the reserve filling system when opening the gate valve.

Klíčová slova: physical research, navigation lock, strutting gate, direct filling, Dissipation kinetic energy

3 Úvod

Přímé plnění plavebních komor (PK) je navrhováno zejména na komorách nízkého spádu a jako rezervní systém na komorách vysokého spádu. Pro plavební komoru Děčín je systém přímého plnění navržen jako rezervní systém, který bude ve funkci za předpokladu, že bude odstaven systém dlouhých obtoků. Plavební komora Děčín je rozdělena na velkou (VPK) a malou plavební komoru (MPK). Toto rozdělení je tvořeno středními vzpěrnými vraty, které umožňují přímé plnění a prázdnění jednotlivých částí PK. Článek se zabývá optimalizací těchto středních vrat pro plnění velké plavební komory. Celková užitná délka VPK je 140,0 m, šířka 12 m a maximální spád je 5,56 m.

Motivace výzkumu vyplývá ze snahy zajištění spolehlivé funkce plavební komory v havarijním režimu, kdy je hlavní plnicí a prázdnicí systém dlouhých obtoků odstaven z provozu. Pozornost byla zaměřena na možnosti optimalizace tlumení kinetické energie pod vraty velké plavební komory, a to zejména optimalizací návrhu polohy uzávěru a úpravou provozní manipulace nastavením rychlosti otvírání v rámci rezervního systému plnění při otvírání vrat. Řešení hydraulicky komplikovaného proudění při přímém plnění probíhalo v neustálených režimech proudění, které umožní sledovat chování proudící vody po celou dobu plnění.

Výzkum byl realizován na stávajícím objektovém modelu plavební komory Děčín v měřítku 1:20, který byl vybudován v rozsahu celé plavební komory, systému plnění a prázdnění, horní rejdy v délce 100 m, dolní rejdy v délce 60 m a jednoho jezového pole a je umístěn ve vodohospodářské laboratoři ČVUT v Praze, Fakultě stavební.

4 Síly působící na plavidla při proplavování PK

Během proplavování plavidel v plavební komoře působí na plavidla horizontální a vertikální síly. Vertikální síly jsou eliminovány vlastní hmotností plavidel. Horizontální síly se dělí na příčné a podélné. Příčné horizontální síly jsou kolmé na osu komory, jsou v porovnání s podélnými silami poměrně malé a jsou zachytávány v bočních zdech komory.

Kritické z hlediska návrhu jsou horizontální podélné síly, které působí rovnoběžně s osou komory. Působením těchto sil by se proplavované plavidlo mohlo dát do pohybu a narazit do vrat komory. Z uvedeného důvodu je třeba plavidla uvažovat úvaznými lany, pro jejichž návrh je klíčová znalost maximálních podélných sil. Podélná síla působící na loď proplavovanou komorou se skládá ze třech složek:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (1)$$

Složka P_1 představuje proudový odpor lodě, který je způsoben obtékáním plavidla vodním proudem. Tento proud má během plnění komory směr proti přední plavidla, během prázdnění proti zádi a podél boků a dna. Složka P_2 je vyvolána podélným sklonem hladiny v komoře na počátku užité délky, kde se mění kinetická energie vodního proudu v potenciální. Složka P_3 je vyvolána vlněním hladiny v komoře, které je způsobeno změnami přítoku vody do komory při jejím plnění, nebo odtoku z komory při jejím prázdnění.

Z literatury (Medřický, 2005) vyplývá, že složky P_1 a P_2 jsou poměrně malé a činí cca 12% až 15% celkové síly P . Navíc složky P_1 a P_2 působí proti sobě, takže se vzájemně téměř eliminují a lze je ve výpočtu zanedbat. Velikost složky P_3 , která má na určení maximální hodnoty podélné síly zásadní význam, je odvozena v literatuře (Čábelka, 1976) a závisí na maximální okamžité změně přítoku (odtoku) do komory podle vztahu:

$$P_3 = W \cdot i = \frac{W}{g \cdot (f_k - f_\varepsilon)} \left(\frac{dQ}{dt} \right)_{\max} \quad (2)$$

kde W je celkový výtlak lodě nebo soupravy [t], i je maximální sklon hladiny vody v komoře [-], f_k je příčná plocha vodní náplně komory [m²] a f_ε je příčná plocha hlavního žebra ponořené části plavidla [m²]. Hodnotu dQ/dt lze přímo vyhledat ve výpočtu časového průběhu plnění (prázdnění) plavební komory.

Na základě rovnice (2) lze stanovit maximální podélný sklon v plavební komoře pro typové plavidlo dané vodní cesty. Pro návrhovou sestavu TR610 + 1,5 TČ pro Dolní Labe (třída vodní cesty Vb) je limitní podélný sklon roven 1,26 ‰.

Jiný využívaný způsob maximálního namáhání plavidel při proplavování doporučuje mezinárodní plavební asociace PIANC (Thorenz, 2009), která formuluje maximální dovolené podélné sklony hladiny v plavební komoře v závislosti na třídě vodní cesty, viz tab. 1.

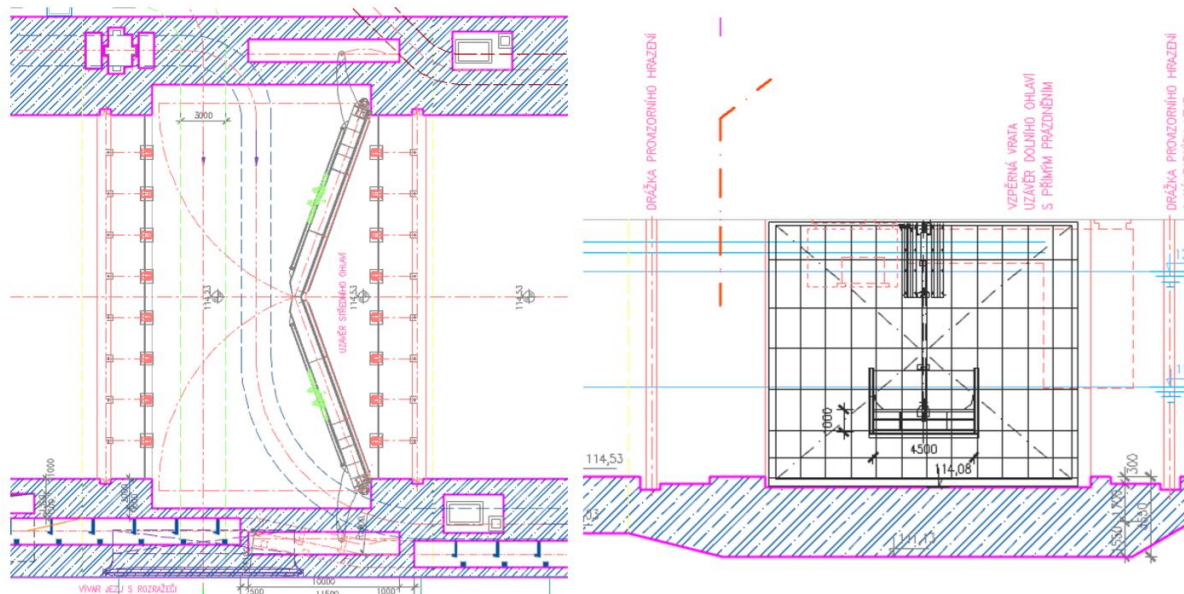
Tab. 1: Maximální povolené podélné sklony dle PIANC

třída	L x B x T	plnění	plnění (plovoucí úvazné prvky)
		(pevné úvazné prvky)	prázdnění
IV	80x9,45x2,8 m	1,10 ‰	1,50 ‰
Va	135x11,4x3,5 m	0,85 ‰	1,15 ‰
Vb	190x11,4x3,5 m	0,75 ‰	0,75 ‰
rekreační plavidla		3 ‰	3 ‰

Dle tab. 1 vyplývá, že doporučený podélný sklon dle PIANC je 0,75 ‰ a je tedy o něco konzervativnější než limitní sklon z výpočtu podle vztahu (2).

5 Přímé plnění velké plavební komory

Dispozice plnicích otvorů ve vzpěrných vratech ve středním ohlavi je znázorněna na obr. 1. V každé vrátni je navržen jeden otvor o světých rozměrech 4,5 x 1,0 m se spodním okrajem ve výšce 2,0 m nade dnem plavební komory. Pohled na vrata VPK na modelu je zobrazen na obr. 2.



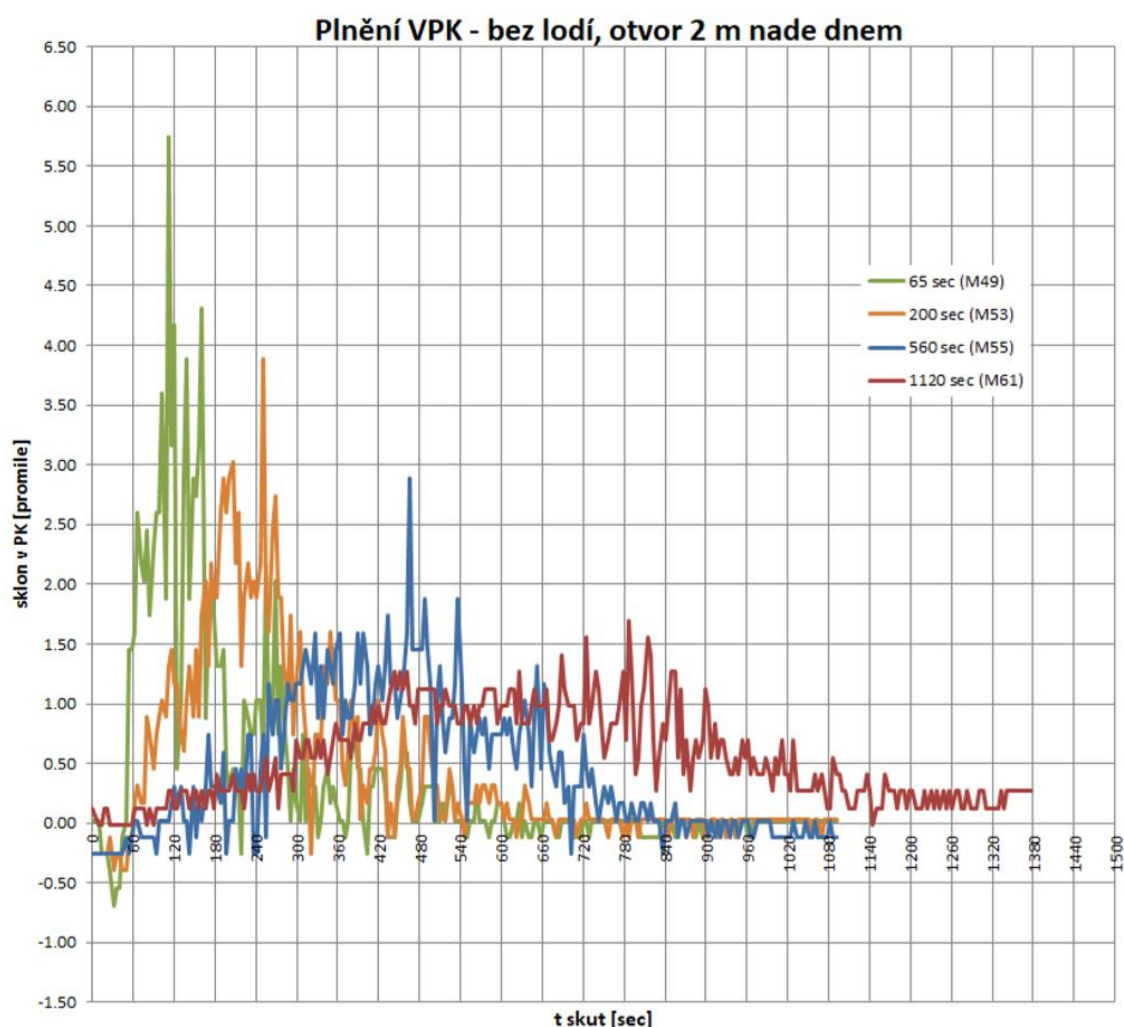
Obr. 1: Dispozice plnicích otvorů ve vzpěrných vratech ve středním ohlavi (Aquatis 2012).



Obr. 2 Vzpěrná vrata s pohybovacím mechanismem na modelu

V rámci výzkumu přímého plnění VPK byla pozornost zaměřena na následující aspekty: ověření časů plnění a prázdnění, kontrola podélných sklonů hladiny (vliv na síly v úvazných lanech), kontrola tlumení kinetické energie pod středními vraty.

V první fázi byly testovány lineární režimy otevírání uzávěrů plnicích otvorů s dobami otevírání $T_z = 65, 200, 560$ a 1120 sec. Na obr. 3 jsou znázorněny průběhy podélných sklonů ve VPK. Z analýzy je zřejmé, že ani doba otevírání uzávěrů $T_z = 1120$ sec neumožňuje zachování limitního podélného sklonu o velikosti $i_{max} = 1,26$ ‰. Experimenty přinesly zjištění, že režim plnění je třeba výrazně zpomalit, aby bylo zajištěno kritérium limitních podélných sklonů. Během těchto manipulací se také projevila výrazně odlišná proporce mezi základními silami působícími na proplavované plavidlo, než udává literatura. Kromě podélných sklonů způsobených vlněním hladiny se silně projevuje podélný sklon způsobený vlivem rychlostní výšky na počátku užité délky VPK a zvýšených hodnot dosahuje také proudový odpor (měřeny byly rychlosti v hloubce ponoru proplavovaných souprav).



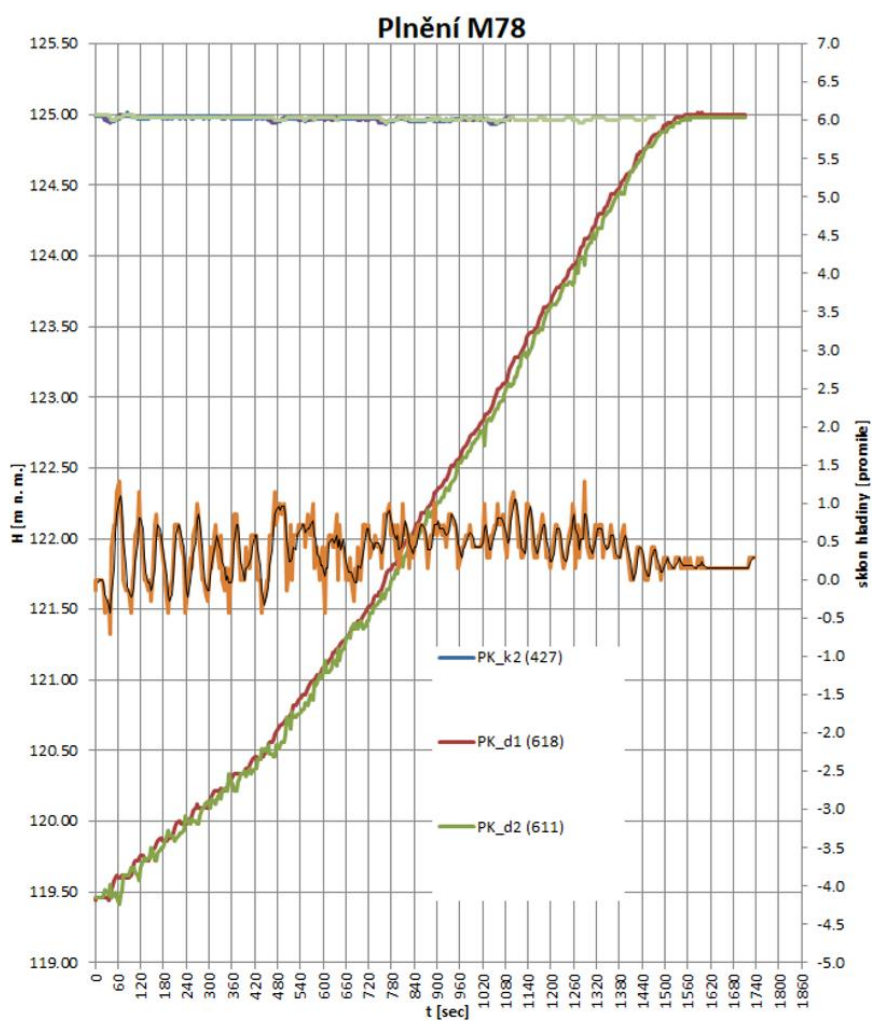
Obr. 3 Průběhy podélných sklonů ve VPK při přímém plnění a max. spádu PK

Z důvodu zlepšení provozních režimů bylo přistoupeno k nelineárním manipulacím realizovaných postupným otevíráním stavítek plnicích otvorů ve vratech. Předmětem optimalizace bylo nalezení optimální sekvence zdvihů a časových prodlev uzávěrů během přímého plnění. Rychlosti pohybu uzávěrů byly nastaveny v rozmezí 2 až 5 cm/sec (ve skutečnosti). Tato hodnota vyplynula z měření rychlosti pohybu uzávěrů na vodních dílech dolního Labe a zkušeností projektantů ocelových konstrukcí vodních děl. Nalezená optimální sekvence otevírání stavítek (označení M78 – viz tab. 2) umožňuje zajistit naplnění VPK v časovém intervalu 25 až 30 minut bez překročení limitních sklonů.

Jako výsledná rychlost pro pohyb uzávěrů stavítek byla zvolena rychlost 4 cm/sec. Následující obr. 4 znázorňuje průběh hladiny a podélného sklonu ve VPK během výsledné varianty nelineárních manipulací. Vybrané testované režimy pohybu stavítek uvádí tab. 2.

Tab. 2: Nelineární manipulace pro tři vybrané varianty

rychlost zdvihu stavítka:	4 cm/sec					
varianta:	M71		M73		M78	
	výška zdvihu	prodleva	výška zdvihu	prodleva	výška zdvihu	prodleva
	[cm]	[sec]	[cm]	[sec]	[cm]	[sec]
1. zdvih	10	402	10	402	15	402
2. zdvih	20	402	25	402	25	268
3. zdvih	40	134	50	268	35	268
4. zdvih	60	134	100		50	201
5. zdvih	100				75	134
6. zdvih					100	
dobu plnění [min:sec]	25:00		25:00		26:00	
imax [‰]	1.68		1.97		1.23	



Obr. 4: Výsledná nelineární manipulace M73 (viz tab. 2).

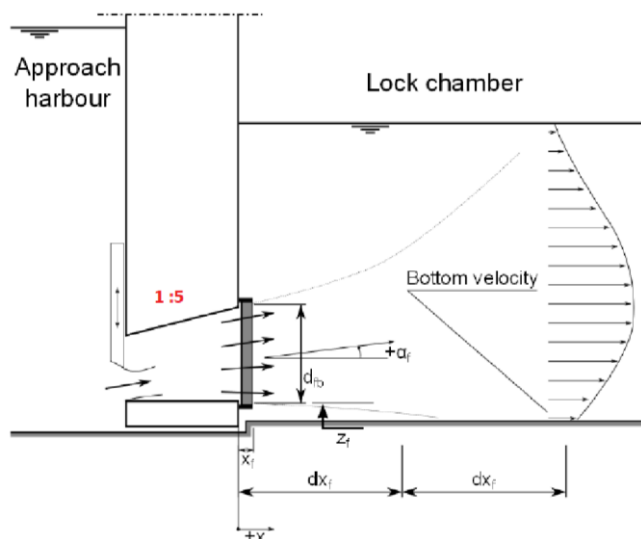
Po splnění podélných sklonů nelineární manipulace uvažovat bylo dále testovány prvky pro zlepšení tlumení kinetické energie pod středními vraty s ohledem na zmírnění turbulentních projevů. Pro řešení této situace připadá dle literatury řada možných opatření:

- kónické rozšíření prostupu plnicího otvoru ve vratech v horizontálním a vertikálním směru (tloušťka vrat se předpokládá cca 1,0 m),
- nasměrování vedení v prostupu směrem ke dnu,
- realizace vývaru a rozrážečů ve dně pod vraty,
- snížit polohu otvoru ve vratech směrem ke dnu,
- snížit výšku a zvýšit šířku otvorů ve vratech,
- realizovat tlumicí prvky ve vratech (podle vzoru holandských nízkospádových PK).

S ohledem na provozní hlediska rozhodnuto v rámci výzkumu sledovat pouze tyto varianty tlumení:

- kónické rozšíření prostupu plnicího otvoru ve vratech v horizontálním a vertikálním směru,
- snížit polohu plnicích otvorů 1,0 m nad dno.

Kónické rozšíření otvoru ve směru proudění ve vzpěrných vratech bylo realizováno v úhlu odklonu 1:5 dle obr. 7 na šířku vrat 1,0 m. Cílem je větší disipace kinetické energie a snížení proudového odporu na plavidla.



Obr. 5: Schéma kónického rozšíření plnicího otvoru ve vzpěrných vratech (Deltares, 2016).

Základní varianta plnicích otvorů předpokládá výšku jejich spodní hrany nade dnem plavební komory 2,0 m. Varianta se sníženými otvory má spodní hranu otvorů ve výšce 1,0 m nade dnem plavební komory. Následující tab. 3 přináší srovnání posuzovaných variant s ohledem na maximální podélný sklon ve VPK.

Tab. 3 Porovnání variant s úpravou plnicích otvorů.

typ otvoru ve vzpěrných vratech	poloha spodní hrany otvoru nade dnem PK	imax [‰]
rovný otvor	2 m	1.44
	1 m	1.36
horizontálně rozšířený otvor	2 m	1.50
	1 m	1.26
horizontálně a vertikálně rozšířený otvor	2 m	1.39
	1 m	0.84

Na základě výsledků dle tab. 3 vyplývá jednoznačná tendence snižování podélného sklonu v VPK pro varianty se sníženou polohou plnicích otvorů. Nejlepších výsledků bylo systematicky (pokusy byly vždy několikrát opakovány) získáno pro variantu horizontálně a vertikálně rozšířeného otvoru ve vratech se snížením spodní hrany na úroveň 1 m nade dno plavební komory. Tato úprava je znázorněna na obr. 8.

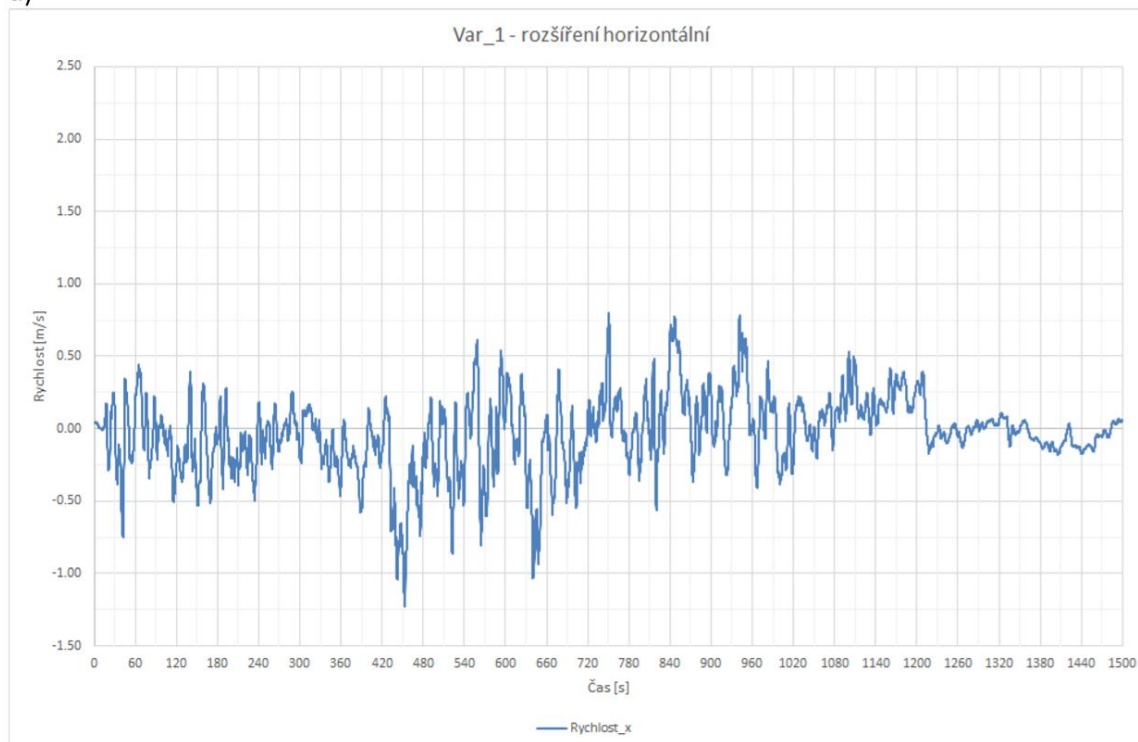


Obr. 6: Detail úpravy plnicích otvorů s horizontálním a vertikálním rozšířením na fyzikálním modelu.

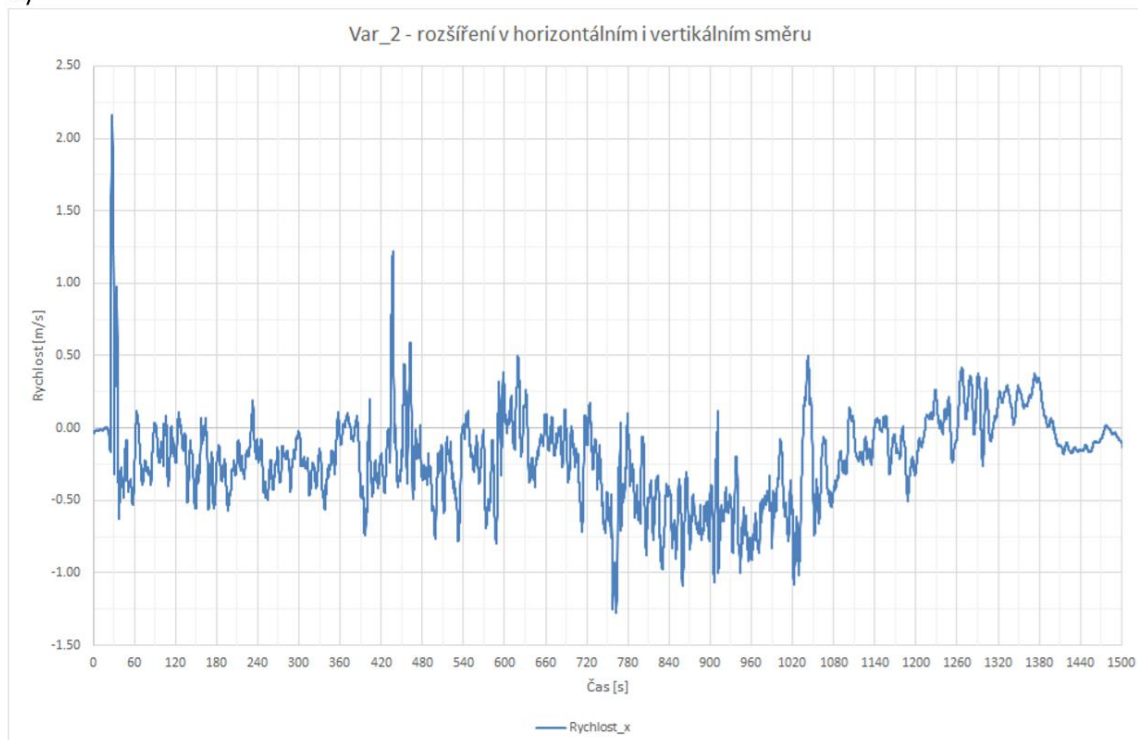
Dále byly pro případ obou variant s přípustnými podélnými sklony (jsou označené v tab. 3) vyšetřeny rychlostní poměry u dna přídě návrhové soupravy před plnicími otvory. Měření bylo realizováno ultrazvukovou sondou a výsledky této analýzy jsou znázorněny na obr. 9, ve kterém jsou vyneseny rychlosti v podélném směru (v ose VPK). Kladný směr proudění je ve směru po proudu Labe.

Z obr. 9 plyne vysvětlení významně nižších podélných sklonů v případě varianty 2. Důvodem je systematická převaha smyslu proudění v oblasti u dna plavidla směrem ke středním vratům. Tím dochází k částečnému potlačení efektu snížení hladiny pod vraty o rychlostní výšku a tedy ke snížení podélných sklonů ve VPK.

a)



b)



Obr. 7: Průběh podélných rychlostí ve VPK během plnění: a) varianta 1 – horizontální rozšíření otvorů, spodní hrana 1 m nade dnem, b) varianta 2 – horizontální a vertikální rozšíření otvorů, spodní hrana 1 m nade dnem.

6 Závěr

Při přímém plnění velké plavební komory experimenty ukázaly obtíže v případě lineárních manipulací, kde nebylo možné v rozumné době plnění zajistit naplnění velké plavební komory při dodržení limitního podélného sklonu, který stanoven dle mezinárodní plavební asociace PIANC. Pro snížení podélného sklonu se tak přistoupilo realizaci nelineárních manipulací, na jejichž základě bylo možné zajistit kritéria limitního sklonu. V další fázi výzkumu byl optimalizován tvar a umístění plnicích otvorů ve vzpěrných vratech k účinnějšímu tlumení kinetické energie. Úprava polohy a tvaru výtokového otvoru přinesla další významné zlepšení provozního režimu i bez nutnosti dalších prvků přispívajících k disipaci kinetické energie. Experimenty bylo prokázáno, že nelineární manipulace a poloha plnicích otvorů přispívá k redukci sil, které působí na proplavované plavidlo a tím umožní bezproblémové proplutí plavební komorou.

Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory Studentské grantové soutěže ČVUT při řešení projektu č.: SGS18/121/OHK1/2T/11 s názvem „Výzkum metod tlumení kinetické energie při přímém plnění a prázdnění plavebních komor“.

7 Reference

Aquatis, a.s. (2012) *Optimalizace plavební komory Děčín*. Předprojektová příprava.

Čábelka J, Novák P (1987) *Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice (1)* - Výzkum na hydraulických dílech a ve skutečnosti. Academia Praha, 303 s

Deltares (2016) *LockFill - User and Technical Manual*, Deltares - Delft, 2016

Fošumpaur P, Kašpar T, Králík M, Kučerová J, Zukal M (2016) *Fyzikální hydraulický modelový výzkum plavební komory Děčín*. Závěrečná zpráva. ČVUT v Praze, Fakulta stavební.

Medřický V, Valenta P (2005) *Vodní cesty – Navrhování plavebních komor*. ČVUT v Praze. ISBN: 978-80-01-04390-5