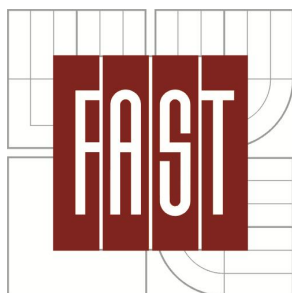


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ ODLEHČOVACÍCH
KOMOR NA STOKOVÝCH SÍTÍCH
MATHEMATICAL MODELLING OF CSO CHAMBERS

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ING. TOMÁŠ STUDNIČKA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. PETR PRAX, Ph.D.

BRNO 2013

Klíčová slova:

matematické modelování, odlehčovací komora, účinnost separace, normá stěna

Keywords:

mathematical modelling, CSO chamber, separation efficiency, scum board

Bibliografická citace disertační práce

STUDNIČKA, Tomáš. *Matematické modelování odlehčovacích komor na stokových sítích*. Brno, 2013. 116 str. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí disertační práce Ing. Petr Prax, Ph.D.

OBSAH

1 ÚVOD.....	4
2 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE	4
3 METODIKA	5
3.1 Modelování znečišťujících látek	6
3.2 Tvarové řešení norné stěny	7
4 VLASTNÍ VÝSLEDKY.....	8
4.1 Porovnání odlehčovací komory navržené podle směrnice a normy ATV-A 111	8
4.1.1 Výsledky simulací.....	9
4.2 Porovnání odlehčovací komory navržené podle normy ATV-A 111 a směrnice	11
4.2.1 Výsledky simulací.....	12
4.3 Vliv norné stěny na separační účinnost odlehčovací komory s bočním přepadem a vysokou přelivnou hranou.....	15
4.3.1 Výsledky simulací.....	15
5 ZÁVĚR	22
6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	25

1 ÚVOD

Odlehčovací komory jsou stěžejními objekty na stokových sítích, neboť ovlivňují jak stokovou síť, tak i recipient. Při návrhu odlehčovací komory proto musí být zohledněna hydraulická, hydrologická i hygienická hlediska, přičemž tato jednotlivá hlediska se vzájemně ovlivňují a úzce spolu souvisejí (HLAVÍNEK et. al., 2001). To činí jejich návrh ale i posouzení velmi složitým. Pro výpočty odlehčovacích komor byla různými autory v minulosti navržena řada výpočetních postupů a metod, které měly projektantům usnadnit návrh odlehčovacích komor (např. de Marchi, Kunštátský) (PRAX , 2003). Tyto postupy zohledňovaly pouze hydraulickou stránku návrhu a posouzení odlehčovacích komor. V posledních desetiletích se s rozvojem výpočetní techniky začalo využívat jednodimenzionálních nestacionárních modelů pro modelování hydraulických a chemicko-fyzikálních procesů ve stokových sítích. Dostupné softwarové prostředky používané pro modelování stokových sítí (Mike URBAN, Infoworks ICM, SWMM, atd.) umožňují zjistit nejen hydraulické chování odlehčovací komory na stokové síti, ale i jaký bude její dopad na recipient z hlediska vnosu znečištění. Jednodimenzionální nestacionární modely využívají pro výpočet přepadu v odlehčovací komoře rovnici přepadu či rovnice založené na celkové energii proudění. Přepadové množství je pak počítáno za předpokladu využití celé délky přelivné hrany. Tento předpoklad však ve skutečnosti u spousty odlehčovacích komor není splněn. V důsledku toho nemusí hydraulické chování odlehčovacích komor (3D turbulentní proudění o volné hladině s proměnnou hladinou po přelivné hraně) odpovídat obvyklým rovnicím přepadu, které se běžně používají pro výpočet přepadového množství. Pro podchycení časoprostorových změn proudění v odlehčovacích komorách je již nezbytné plné zvládnutí třidimenzionálního nestacionárního matematického modelování.

2 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

Předkládaná práce je zaměřena na využití třidimenzionálního matematického modelování pro simulaci proudění v odlehčovacích komorách s bočním přepadem. Pro matematické modelování je použit komerčně dostupný softwarový prostředek FLOW-3D od společnosti Flow Science Inc.

Práce je zaměřena na odlehčovací komory s jednostranným bočním přepadem, neboť se jedná o nejběžněji využívaný typ odlehčovacích komor na stokových sítích nejen v České republice.

Při přepadech vody z odlehčovací komory dochází ke vnosu znečištění ze stokové sítě do recipientu. Snížení vnosu nerozpuštěných látek z odpadních vod do recipientu lze dosáhnout hydraulicky vhodným tvarovým řešením objektu odlehčovací komory. Boční odlehčovací komora s vysoko položenou přelivnou hranou je doporučovaným konstrukčním typem, přičemž je nutno věnovat pozornost samotnému tvarovému řešení odlehčovací komory.

Mezi nejlépe využitelné typizační směrnice v oblasti návrhu odlehčovacích komor patří směrnice (HYDROPROJEKT PRAHA, 1977), které vychází z výzkumných

prací zpracovaných na VÚVH v Bratislavě. Další zpracovaný postup pro návrh odlehčovacích komor se nabízí v německé normě ATV-A 111, která je projektanty v České republice také používána.

Předkládaná disertační práce využitím matematického modelování ověří režim proudění v odlehčovacích komorách navržených podle výše uvedených směrnic.

Práce doporučí suboptimální režim nastavení modelu turbulence a výpočetní mřížky s cílem maximalizování efektivity numerických simulací. Výsledky simulací jsou porovnány s údaji získanými dle postupů uvedených ve směrnících. Na takto verifikovaných matematických modelech odlehčovacích komor je pak provedeno modelování účinnosti separace znečišťujících látek.

V legislativě ekonomicky vyspělých států je zakotven požadavek, aby odlehčovací komory byly vybaveny technickým opatřením, které minimalizuje vnos plovoucích látek do recipientů. Lze očekávat, že obdobný požadavek bude obsažen v příštích letech také v české legislativě. Při úpravě stávajících odlehčovacích komor budou implementována technická opatření vyznačující se nízkými investičními náklady, které nebudou vyžadovat velké stavební úpravy objektů odlehčovacích komor. Mezi takto definovaná technická opatření patří norné stěny, česla a síta. Obzvláště norné stěny se vyznačují nejnižšími investičními a provozními náklady.

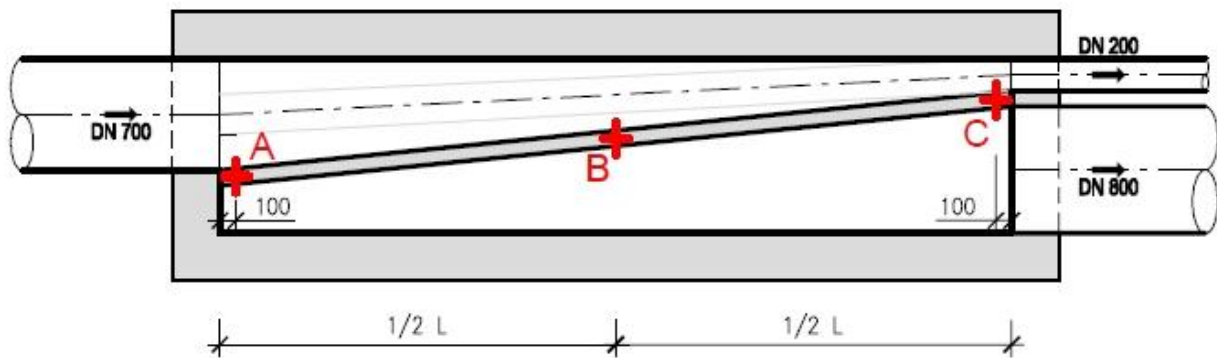
V disertační práci je doporučen prakticky využitelný matematický model popisující charakter a distribuci znečišťujících nerozpuštěných látek obsažených v odpadních vodách. S jeho využitím je možno vyhodnotit účinnost hydroseparace v ověřovaném typu odlehčovací komory.

V disertační práci je pomocí matematických simulací ověřen vliv umístění norné stěny v odlehčovací komoře s bočním přepadem a vysokou přelivnou hranou na hydroseparační účinnost z hlediska nerozpuštěných látek. Norná stěna je v odlehčovací komoře umístěna v různých polohách, které jsou definovány vzdáleností od přelivné hrany a vzdáleností, kterou norná stěna zasahuje pod kótu přelivné hrany. Disertační práce tak prověří vliv umístění norné stěny na hydroseparační účinnost odlehčovací komory s bočním přepadem.

3 METODIKA

V předkládané práci jsou provedeny simulace proudění v odlehčovacích komorách navržených pomocí dvou postupů používaných projektanty v České republice (směrnice, německá norma ATV-A 111).

Pro vybrané návrhové parametry je pomocí uvedených postupů navrženo tvarové řešení odlehčovací komory. To je poté zadáno do softwaru FLOW-3D a je provedena simulace proudění pro návrhový průtok. Výsledky simulací jsou porovnány s údaji získanými z použitých směrnic a výpočetních postupů (odtok z OK při návrhovém přítoku, a přepadové výšky na začátku a konci přelivné hrany).



Obr. 3.1 Místa zjišťování přepadových výšek v OK

V softwaru FLOW-3D je též simulována separační účinnost a použité postupy pro návrh odlehčovacích komor jsou porovnány i z hlediska účinnosti separace.

Simulace v programu FLOW-3D jsou provedeny následovně:

- je provedena citlivostní analýza vlivu hustoty výpočetní mřížky (velikosti výpočetní buňky) na výsledky simulací, tzn. simulace je provedena s různými výpočetními mřížkami (v práci jsou použity 3 výpočetní mřížky s délkou hrany výpočetní buňky L , $L/2$ a $L/4$ označené jako hrubá, střední, jemná výpočetní mřížka);
- jsou použity 2 různé modely turbulence (k- ϵ model a RNG k- ϵ model) pro každou použitou výpočetní mřížku;
- a účinnost separace znečišťujících látek v odlehčovacích komorách je simulována pro každou výpočetní mřížku a model turbulence.

3.1 MODELOVÁNÍ ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK

Polutanty jsou obvykle navázány na jemnější frakce nerozpuštěných látek ($<63 \mu\text{m}$) (BUTLER et. al., 2004). Z tohoto důvodu jsou v simulacích použity též částice o velikosti menší $63 \mu\text{m}$. Celkem byly v simulacích použity 4 druhy částic lišících se velikostí a hustotou (viz. Tab. 3.1). Uvedené frakce částic jsou převzaty z metodiky používané Pollertem ml. pro posouzení účinnosti separace znečišťujících látek v odlehčovacích komorách (viz. např. (POLLERT et. al., 2003), (POLLERT et. al., 2008)).

Označení částic	F1	F2	F3	F4
Průměr částice [mm]	0,001	0,01	0,1	1,0
Hustota částice [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1300	1800	2600	2600

Tab. 3.1 Simulované částice znečištění

Částice jsou do modelu „vpouštěny“ ve vzdálenosti 10tinásobku profilu přírodního potrubí rovnoměrně po celém průtočném profilu. Ve výpočtech je simulován časový

úsek o délce 100 s. Na začátku výpočtu nejsou ve výpočetní oblasti přítomny žádné částice. Částice jsou generovány po dobu 60 s rovnoměrně v čase a prostoru následovně:

- „rychlostí“ 5000 částic za 1 s u odlehčovacích komor v kapitole 4.1;
- „rychlostí“ 10000 částic za 1 s u odlehčovacích komor v kapitole 4.2.

V časovém úseku 60 s až 61 s dojde k ukončení generování částic a to až do konce simulovaného časového úseku.

V průběhu výpočtu je zaznamenáván počet částic na vstupu do odlehčovací komory, na odtoku z odlehčovací komory a v případě množství přes přelivnou hranu. Účinnost separace pro danou frakci částic je počítána podle vztahu (DUFRESNE et. al. , 2009):

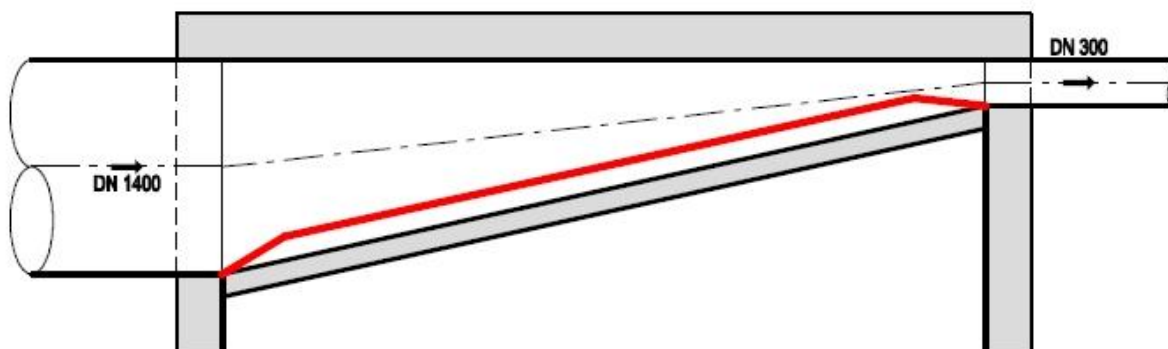
$$\eta = \left(\frac{m_{\text{přítok}} - m_{\text{přepad}}}{m_{\text{přítok}}} \right) \cdot 100\% \quad (1)$$

kde $m_{\text{přepad}}$ je hmotnost částic v případě množství z odlehčovací komory a $m_{\text{přítok}}$ je hmotnost částic přeteklých do odlehčovací komory.

3.2 TVAROVÉ ŘEŠENÍ NORNÉ STĚNY

Tvar norné stěny použitý v předkládané práci je na Obr. 3.2. Uvedené tvarové řešení bylo převzato z britské příručky pro návrh odlehčovacích komor. V provedených simulacích byla norná stěna umístěna v několika vybraných polohách, které byly definovány:

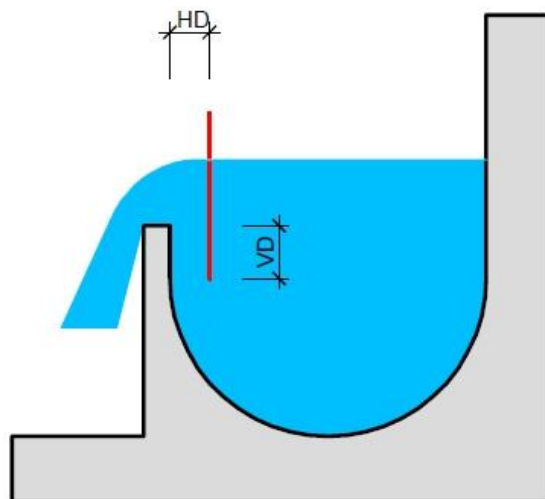
- horizontální vzdálenosti od přelivné hrany (označeno **HD** na Obr. 3.3);
- a vzdáleností spodní části norné stěny od úrovně přelivné hrany (označeno **VD** na Obr. 3.3).



Obr. 3.2 Půdorysné schéma umístění norné stěny v odlehčovací komoře

V simulacích byly použity tyto hodnoty vzdáleností HD a VD:

- HD = 0,10×D; 0,15×D; 0,20×D;
- VD = 0,10×D; 0,15×D; 0,20×D.



Obr. 3.3 Schéma umístění normé stěny v odlehčovací komoře v příčném řezu

4 VLASTNÍ VÝSLEDKY

4.1 POROVNÁNÍ ODLEHČOVACÍ KOMORY NAVRŽENÉ PODLE SMĚRNICE A NORMY ATV-A 111

Odlehčovací komora byla navržena pro návrhový průtok $Q_N = 573,0$ l/s; hraniční průtok $Q_{hr} = 50,0$ l/s; dimenze přítokového potrubí DN 700. Drsnost stěn byla 2,0 mm; sklon přítokového potrubí 4,5 ‰.

V simulacích byly použity 3 různé výpočetní mřížky:

- hrubá (velikost výpočetní buňky $0,050 \text{ m} \times 0,050 \text{ m} \times 0,050 \text{ m}$),
- střední (velikost výpočetní buňky $0,025 \times 0,025 \times 0,025 \text{ m}$),
- a jemná (velikost výpočetní buňky $0,025 \text{ m} \times 0,0125 \text{ m} \times 0,0125 \text{ m}$).

Parametr	Jednotky	Směrnice	ATV-A 111
Délka přelivné hrany	[m]	5,0	5,9
Výška přelivní hrany na začátku OK	[m]	0,6	0,6
Výška přelivní hrany na konci OK	[m]	0,7	0,7
Profil škrťící tratě	[mm]	DN 200	DN 200
Délka škrťící tratě	[m]	16,0	15,2
Přepadová výška na začátku OK	[m]	0,085	0,072
Přepadová výška na konci OK	[m]	0,215	0,162
Střední přepadová výška	[m]	0,150	0,132
Překročení hraničního průtoku	[l/s]	57,0	57,0

Tab. 4.1 Navržené parametry odlehčovacích komor

4.1.1 Výsledky simulací

Vypočítané hodnoty odtoku z odlehčovací komory se poměrně dobře shodovaly s hodnotou stanovenou pomocí směrnice/normy (viz. Tab. 4.2).

Postup návrhu OK	Odtok z OK [l/s]	Model turbulence	Odtok z OK [l/s]		
			Hrubá	Střední	Jemná
Směrnice	57,0	k-ε	52,7	56,1	58,0
		RNG k-ε	54,6	57,8	58,6
ATV-A 111	57,0	k-ε	52,8	55,5	57,9
		RNG k-ε	54,4	58,0	59,1

Tab. 4.2 Vypočítané hodnoty odtoku z OK

Z provedených simulací vyplynulo následující:

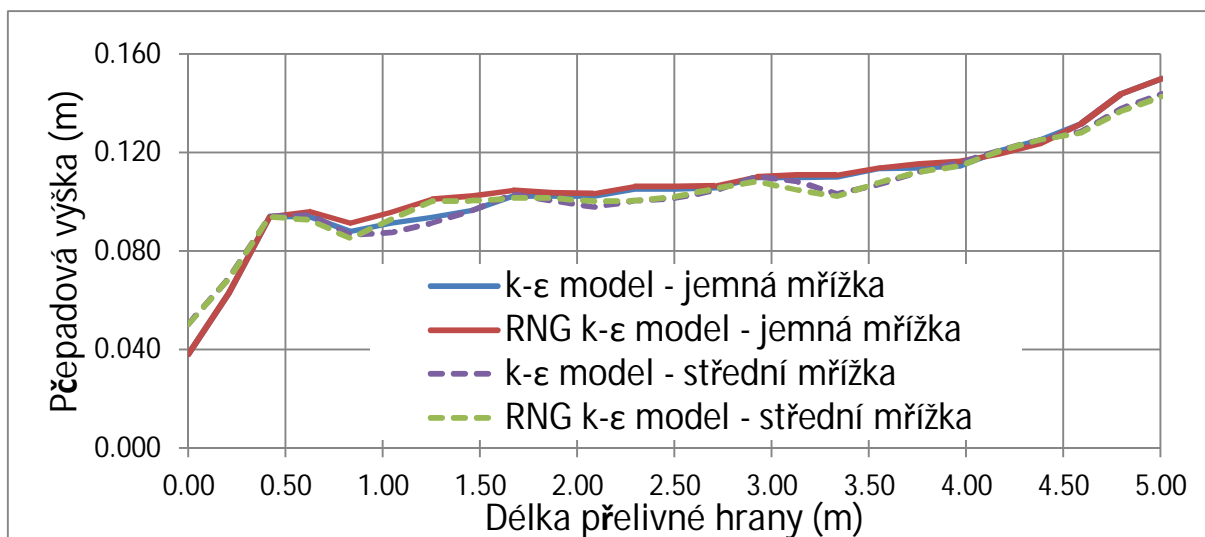
- Predikovaná hodnota odtoku z odlehčovací komory je nepřímo úměrná velikosti výpočetní buňky.
- Predikovaná hodnota odtoku z odlehčovací komory je vyšší v případě použití RNG k-ε modelu turbulence.

Vypočítané hodnoty přepadových výšek na začátku a konci přelivné hrany jsou uvedeny v Tab. 4.3 spolu s hodnotami určenými pomocí směrnice/normy.

Postup návrhu OK	Přepadová výška [m]	Model turbulence	Přepadová výška [m]		
			Hrubá	Střední	Jemná
Směrnice	$h_A = 0,085$	k-ε	0.007	0.033	0.025
		RNG k-ε	0.007	0.035	0.025
	$h_C = 0,215$	k-ε	0.121	0.144	0.150
		RNG k-ε	0.139	0.143	0.150
ATV-A 111	$h_A = 0,072$	k-ε	0.020	0.036	0.038
		RNG k-ε	0.018	0.050	0.038
	$h_C = 0,162$	k-ε	0.121	0.142	0.147
		RNG k-ε	0.121	0.141	0,150

Tab. 4.3 Porovnání přepadových výšek

Z tabulky je patrné, že vypočítané hodnoty přepadových výšek se poměrně značně liší od hodnot stanovených postupem podle směrnice/normy, a to zejména na začátku přelivné hrany v bodě A.



Obr. 4.1 Průběh hladiny podél přelivné hrany – OK navržená dle směrnice

Na Obr. 4.1 je pomocí grafu znázorněn průběh hladiny podél přelivné hrany odlehčovací komory navržené postupem dle směrnice. Průběh hladiny je dán přepadovými výškami v 25 ekvidistantních bodech ležících uprostřed šířky přelivné hrany, které jsou spojeny úsečkami. Přepadové výšky byly získány v programu FlowSight. Na obrázcích není průběh hladin podél přelivné hrany pro hrubou výpočetní mřížku, protože uvedeným postupem získané hodnoty přepadových výšek nabývaly v řadě bodů nereálných hodnot. Vliv použitého modelu turbulence na průběh hladiny po délce přelivné hrany je v tomto případě v podstatě zanedbatelný. U odlehčovací komory navržené podle normy ATV-A 111 je průběh hladiny podél přelivné hrany velmi podobný, navzdory různé délce přelivné hrany.

V Tab. 4.4 a v Tab. 4.5 jsou uvedeny vypočítané hodnoty separační účinnosti odlehčovací komory navržené dle směrnice a normy ATV-A 111 při ustáleném návrhovém průtoku. Stejně jako u odtoku z odlehčovací komory i se vypočítané hodnoty separační účinnosti ve většině případů zvyšují s vyšší hustotou výpočetní mřížky a při použití RNG k- ϵ modelu turbulence. Separační účinnost částic frakce F4 je ve všech případech 100%, k přepadu částic nedošlo.

Model turbulence	Výpočetní mřížka	Účinnost separace [%]			
		F1	F2	F3	F4
k- ϵ model	hrubá	11,17	11,21	24,09	100,00
	střední	12,25	12,35	24,74	100,00
	jemná	12,28	12,54	27,03	100,00
RNG k- ϵ model	hrubá	11,63	11,81	24,78	100,00
	střední	13,17	13,13	26,94	100,00
	jemná	12,86	12,84	27,85	100,00

Tab. 4.4 Separační účinnost – OK navržená podle směrnice

Model turbulence	Výpočetní mřížka	Účinnost separace [%]			
		F1	F2	F3	F4
k-ε model	hrubá	12,02	11,94	25,57	100,00
	střední	12,31	12,44	26,47	100,00
	jemná	12,70	12,73	27,26	100,00
RNG k-ε model	hrubá	12,39	12,40	25,33	100,00
	střední	12,68	12,71	26,66	100,00
	jemná	12,71	12,84	27,32	100,00

Tab. 4.5 Separační účinnost – OK navržená podle normy ATV-A 111

4.2 POROVNÁNÍ ODLEHČOVACÍ KOMORY NAVRŽENÉ PODLE NORMY ATV-A 111 A SMĚRNICE

Odlehčovací komora byla navržena pro návrhový průtok $Q_N = 2200,0$ l/s; hraniční průtok $Q_{hr} = 180,0$ l/s; Drsnost stěn byla 0,25 mm; sklon přítokového potrubí 2,5 ‰.

V simulacích byly použity 3 různé výpočetní mřížky:

- hrubá (velikost výpočetní buňky 0,100 m × 0,100 m × 0,100 m),
- střední (velikost výpočetní buňky 0,050 × 0,050 × 0,050 m),
- a jemná (velikost výpočetní buňky 0,025 m × 0,025 m × 0,025 m).

Parametr	Jednotky	Směrnice	ATV-A 111
Profil přítokového potrubí	[mm]	1000/1500	1400
Délka přelivné hrany	[m]	9,00	11,27
Výška přelivní hrany na začátku OK	[m]	1,25	0,90
Výška přelivní hrany na konci OK	[m]	1,40	0,96
Profil škrťací tratě	[mm]	DN 300	DN 300
Délka škrťací tratě	[m]	16,00	9,25
Přepadová výška na začátku OK	[m]	0,160	0,100
Přepadová výška na konci OK	[m]	0,340	0,260
Střední přepadová výška	[m]	0,250	0,210
Překročení hraničního průtoku	[l/s]	205	215

Tab. 4.6 Navržené parametry odlehčovacích komor

Pro návrhový průtok 2200 l/s nelze pomocí směrnice navrhnout odlehčovací komoru s přítokovým potrubím kruhového profilu. Bylo nutné navrhnout přítokové potrubí vejčitého (Vídeňského) profilu. Na základě profilu přívodního potrubí je pak ve směrnici udána výška přelivné hrany. To je důvodem, proč se výšky přelivných hran odlehčovacích komor v této kapitole liší. Poměrně značné rozdíly ve výšce přelivné hrany a tím i délky škrťací trati jsou důvodem, proč byly získány rozdílné

hodnoty překročení hraničního průtoku u použitých postupů pro návrh odlehčovací komory pro stejné návrhové parametry.

4.2.1 Výsledky simulací

Vypočítané hodnoty odtoku z odlehčovací komory se poměrně dobře shodovaly s hodnotou stanovenou pomocí směrnice/normy (viz. Tab. 4.7).

Z provedených simulací vyplynulo následující:

- Predikovaná hodnota odtoku z odlehčovací komory je nepřímo úměrná velikosti výpočetní buňky.
- Predikovaná hodnota odtoku z odlehčovací komory je vyšší v případě použití RNG k- ϵ modelu turbulence.

Postup návrhu OK	Odtok z OK [l/s]	Model turbulence	Odtok z OK [l/s]		
			Hrubá	Střední	Jemná
ATV-A 111	215,0	k- ϵ	220,0	232,0	236,0
		RNG k- ϵ	227,0	236,0	240,0
Směrnice	205,0	k- ϵ	181,8	197,5	212,8
		RNG k- ϵ	188,3	203,1	212,8

Tab. 4.7 Vypočítané hodnoty odtoku z OK

Vypočítané hodnoty přepadových výšek na začátku a konci přelivné hrany jsou uvedeny v Tab. 4.8 spolu s hodnotami určenými pomocí směrnice/normy.

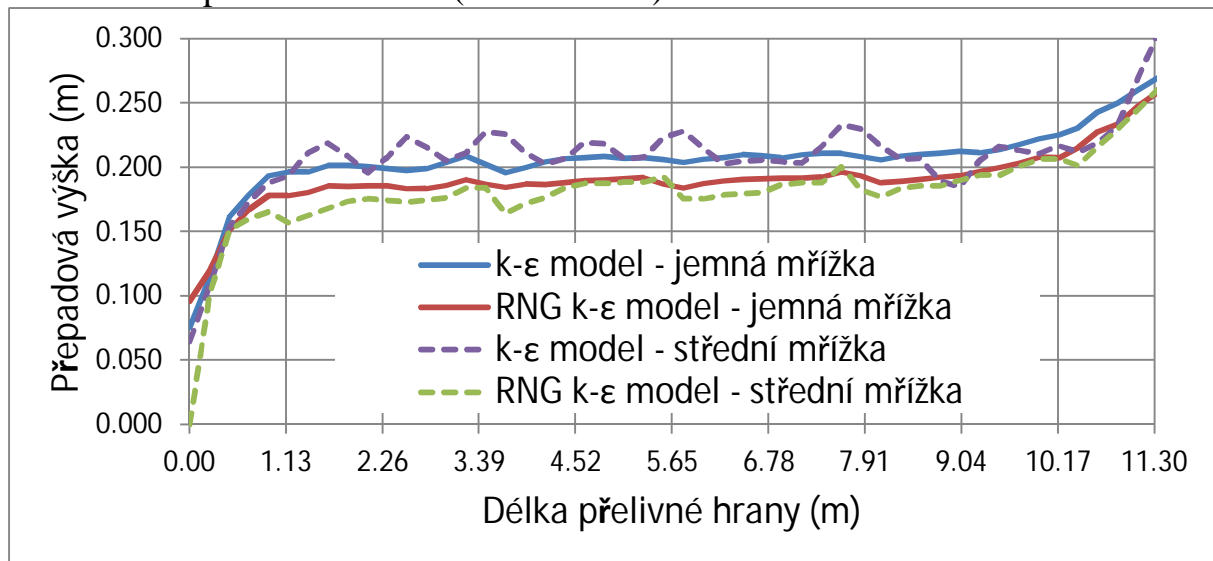
Postup návrhu OK	Přepadová výška [m]	Model turbulence	Přepadová výška [m]		
			Hrubá	Střední	Jemná
ATV-A 111	$h_A = 0,100$	k- ϵ	0,119	0,061	0,075
		RNG k- ϵ	0,119	0,101	0,075
	$h_C = 0,260$	k- ϵ	0,312	0,276	0,279
		RNG k- ϵ	0,311	0,261	0,264
Směrnice	$h_A = 0,160$	k- ϵ	0,052	-	0,014
		RNG k- ϵ	0,052	0,026	-
	$h_C = 0,340$	k- ϵ	0,259	0,250	0,250
		RNG k- ϵ	0,265	0,251	0,250

Tab. 4.8 Porovnání přepadových výšek

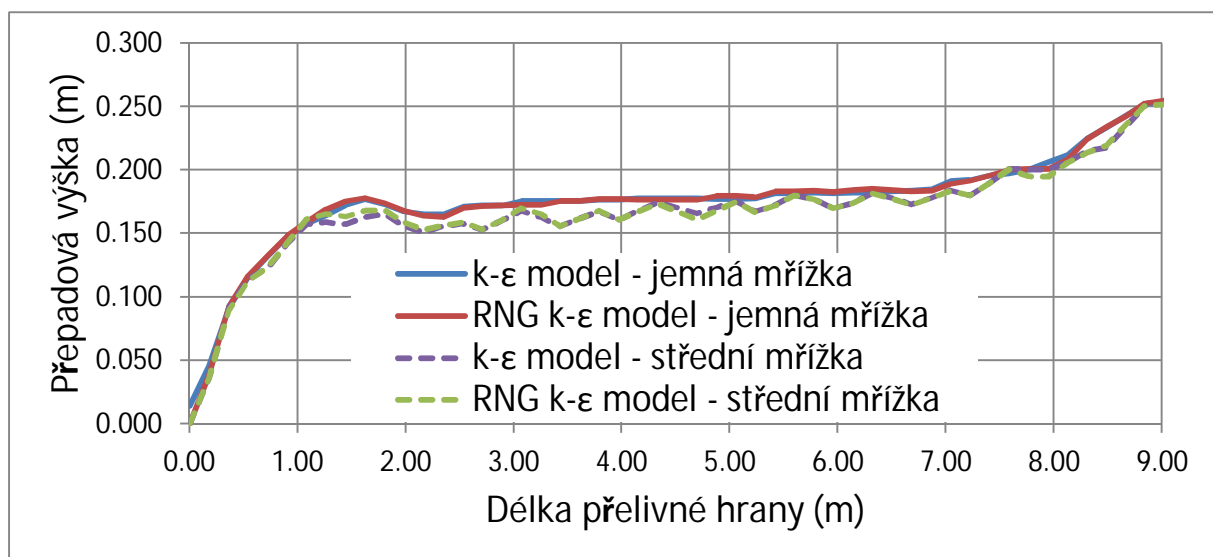
U odlehčovací komory navržené podle normy ATV-A 111 se vypočítané hodnoty přepadových výšek poměrně dobře shodují s hodnotami stanovenými pomocí normy. U odlehčovací komory navržené pomocí směrnice jsou rozdíly mezi vypočítanými a směrnici stanovenými hodnotami značné, zejména na začátku

přelivné hrany v bodě A. Ve dvou případech byla v bodě A zjištěna nulová přepadová výška.

Průběh hladiny podél přelivné hrany je znázorněn na Obr. 4.2 a Obr. 4.3. Pro konstrukci grafu byly v programu FlowSight získány hodnoty přepadových výšek v 51ti ekvidistantních bodech ležících uprostřed šířky přelivné hrany. Na obrázcích není průběh hladin podél přelivné hrany pro hrubou výpočetní mřížku, protože uvedeným postupem získané hodnoty přepadových výšek nabývaly v řadě bodů nereálných hodnot. Z Obr. 4.2 je patrné, že u odlehčovací komory navržené dle normy ATV-A 111 predikoval k- ϵ model turbulence vyšší hodnoty přepadových výšek než RNG k- ϵ model turbulence. U odlehčovací komory navržené dle směrnice byly přepadové výšky získané k- ϵ modelem turbulence i RNG k- ϵ modelem turbulence v podstatě shodné (viz. Obr. 4.3).



Obr. 4.2 Průběh hladiny podél přelivné hrany – OK navržená dle ATV-A 111



Obr. 4.3 Průběh hladiny podél přelivné hrany – OK navržená dle směrnice

V Tab. 4.9 a v Tab. 4.10 jsou uvedeny vypočítané hodnoty separační účinnosti odlehčovací komory navržené dle normy ATV-A 111 a směrnice při ustáleném návrhovém průtoku. Stejně jako u odtoku z odlehčovací komory i se vypočítané hodnoty separační účinnosti ve většině případů zvyšují s vyšší hustotou výpočetní mřížky a při použití RNG k-ε modelu turbulence. Důvodem nižší separační účinnosti odlehčovací komory navržené podle směrnice je pravděpodobně použitá metodika v kombinaci s vejčítým profilem přítokového potrubí. Vzhledem k velikosti a hustotě jsou částice frakce F1 a F2 téměř homogenně rozptýleny po průtočném profilu na vtoku do odlehčovací komory. Z analýzy proudnic vyplynulo, že voda z horních cca. $\frac{3}{4}$ přítokového potrubí vejčitého profilu přepadá z odlehčovací komory a odtok z odlehčovací komory tvoří část vody ze zbylé části průtočného profilu přítokového potrubí. Vzhledem ke tvaru vejčitého profilu je větší počet částic rozptýlen v horní polovině profilu; tyto částice tak přepadnou z odlehčovací komory. Podobně tomu bylo i u částic frakce F3, i když částice na vtoku do odlehčovací komory nebyly homogenně rozptýleny.

Model turbulence	Výpočetní mřížka	Účinnost separace [%]			
		F1	F2	F3	F4
k-ε model	hrubá	13,53	13,62	27,82	99,96
	střední	13,85	13,98	28,11	99,99
	jemná	14,16	14,26	28,70	100,00
RNG k-ε model	hrubá	14,86	14,91	29,15	99,96
	střední	13,91	14,19	28,33	99,99
	jemná	14,37	14,41	28,87	100,00

Tab. 4.9 Separační účinnost – OK navržená podle normy ATV-A 111

Model turbulence	Výpočetní mřížka	Účinnost separace [%]			
		F1	F2	F3	F4
k-ε model	hrubá	11,13	11,19	20,75	100,00
	střední	11,24	11,34	20,75	100,00
	jemná	12,36	12,37	20,84	100,00
RNG k-ε model	hrubá	11,11	11,18	20,74	100,00
	střední	11,88	11,82	21,20	100,00
	jemná	12,95	12,91	21,89	100,00

Tab. 4.10 Separační účinnost – OK navržená podle směrnice

4.3 VLIV NORNÉ STĚNY NA SEPARAČNÍ ÚČINNOST ODLEHČOVACÍ KOMORY S BOČNÍM PŘEPADEM A VYSOKOU PŘELIVNOU HRANOU

Hlavním cílem práce bylo určit vliv norné stěny v odlehčovací komoře s bočním přepadem s vysokou přelivnou hranou na separační účinnost nerozpuštěných látek, tj. porovnat separační účinnost odlehčovací komory pro různé polohy norné stěny. Nebylo záměrem předkládané práce získat údaje o skutečné separační účinnosti odlehčovací komory. Z tohoto důvodu nebylo provedení verifikace modelu separace znečištění považováno za nezbytně nutné.

Vliv norné stěny na separační účinnost byl zkoumán v odlehčovací komoře navržené podle německé normy ATV-A 111 uvedené v kapitole 4.2. Při simulacích separační účinnosti byl použit RNG k- ϵ model turbulence a střední výpočetní mřížka. Důvodem použití střední výpočetní mřížky je skutečnost, že výsledky účinnosti separace uvedené v kapitole 4.2 vykazovaly relativně malý rozdíl mezi střední a jemnou výpočetní mřížkou, přičemž časová náročnost výpočtu při použití jemné výpočetní mřížky byla v porovnání s časovou náročností výpočtu při použití střední výpočetní mřížky zhruba čtyřnásobná.

4.3.1 Výsledky simulací

Instalací norné stěny do odlehčovací komory s bočním přepadem dojde ke zmenšení průtočného profilu. V odlehčovací komoře dojde ke zvýšení hladiny a tím i ke zvýšení hodnoty odtoku z odlehčovací komory. V Tab. 4.11 je uveden vliv polohy norné stěny na množství vody pokračující směrem na ČOV při návrhovém přítoku do odlehčovací komory. Bez norné stěny odtékalo z OK 236 l/s.

Vzdálenost VD	Vzdálenost HD		
	0,10×D	0,15×D	0,20×D
0,10×D	252	246	244
0,15×D	252	245	244
0,20×D	252	246	244

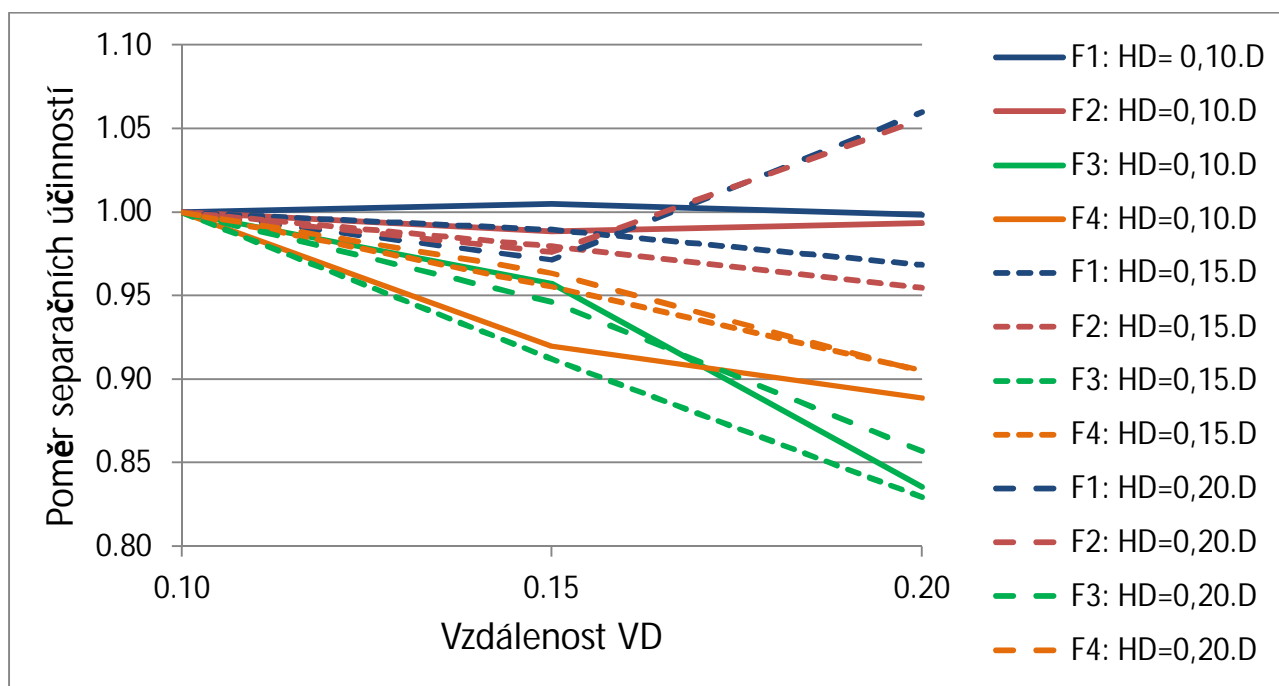
Tab. 4.11 Vliv polohy norné stěny na odtok z odlehčovací komory

Hodnotu odtoku z odlehčovací komory ovlivňuje především vzdálenost norné stěny od přelivné hrany HD. S rostoucí vzdáleností norné stěny od přelivné hrany hodnota odtoku z odlehčovací komory klesá, ale stále je vyšší než hodnota odtoku vypočítaná bez norné stěny. Vzdálenost VD, kterou spodní část norné stěny zasahuje pod úroveň přelivné hrany má na hodnotu odtoku z odlehčovací komory zanedbatelný vliv.

Poloha norné stěny		Účinnost separace [%]			
VD	HD	F1	F2	F3	F4
0,10×D	0,10×D	14.6	14.8	23.2	97.7
	0,15×D	14.5	14.6	24.3	97.6
	0,20×D	13.6	13.6	24.6	97.5
0,15×D	0,10×D	14.7	14.7	22.2	89.8
	0,15×D	14.3	14.3	22.2	93.2
	0,20×D	13.2	13.3	23.3	93.9
0,20×D	0,10×D	14.6	14.7	19.4	86.8
	0,15×D	14.0	14.0	20.1	88.3
	0,20×D	14.4	14.3	21.1	88.2
Bez norné stěny		13.9	14.2	28.3	100.0

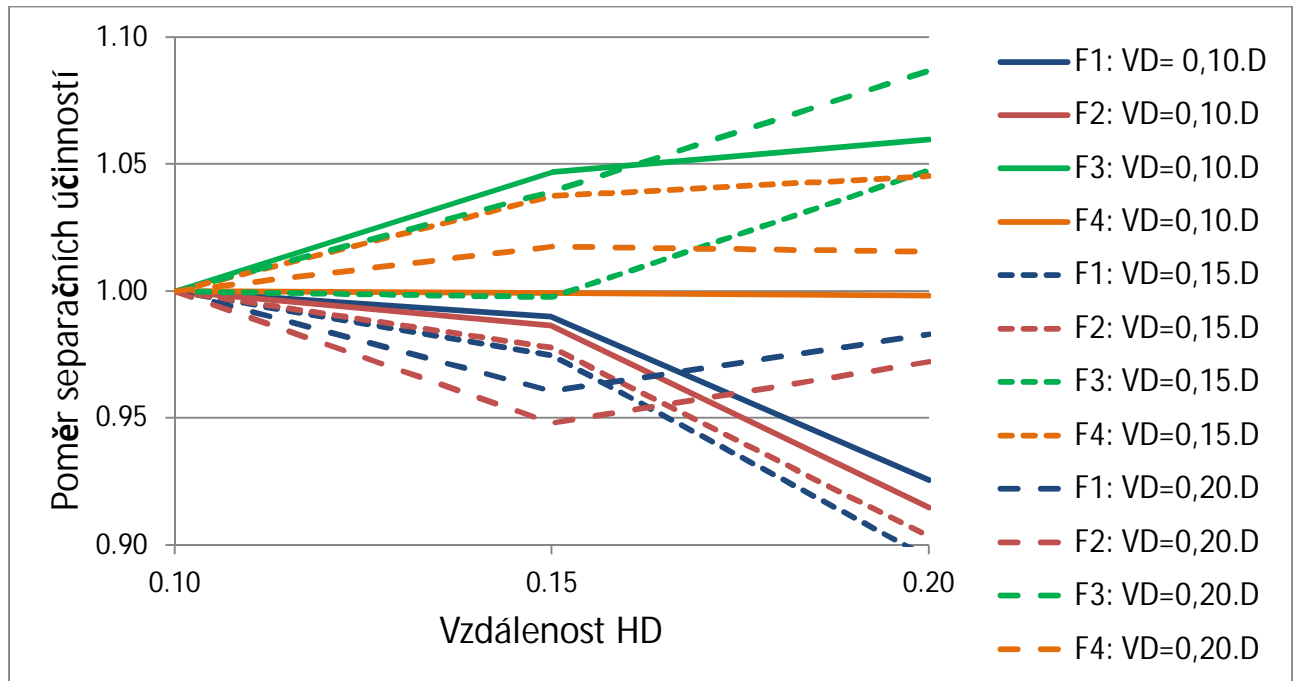
Tab. 4.12 Vliv polohy norné stěny na účinnost separace

V Tab. 4.12 jsou uvedeny vypočítané hodnoty účinnosti separace znečišťujících látek v závislosti na poloze norné stěny v odlehčovací komoře. Z výsledků vyplývá, že instalací norné stěny do odlehčovací komory došlo k mírnému navýšení separační účinnosti u částic frakce F1 a F2 v porovnání se separační účinností odlehčovací komory bez norné stěny. Výraznější vliv měla instalace norné stěny na separační účinnost částic frakce F3, u které došlo ke snížení separační účinnosti o cca. 14–30 % v závislosti na poloze norné stěny. U částic frakce F4 došlo též k poklesu separační účinnosti a to o zhruba 2–12 % v závislosti na poloze norné stěny.



Obr. 4.4 Vliv vzdálenosti VD na separační účinnost

Na Obr. 4.4 je pomocí grafu znázorněn vliv vzdálenosti VD na separační účinnost. Hodnota vzdálenosti VD má větší vliv na separační účinnost frakcí částic F3 a F4, kdy s rostoucí vzdáleností klesá. U částic frakce F1 a F2 není vliv tolik výrazný, pohybuje se do $\pm 5\%$.



Obr. 4.5 Vliv vzdálenosti HD na separační účinnost

Na Obr. 4.5 je pomocí grafu znázorněn vliv vzdálenosti HD na separační účinnost. Separační účinnost částic frakce F3 a F4 roste s rostoucí vzdáleností HD, u částic frakce F1 a F2 naopak s rostoucí vzdáleností HD klesá.

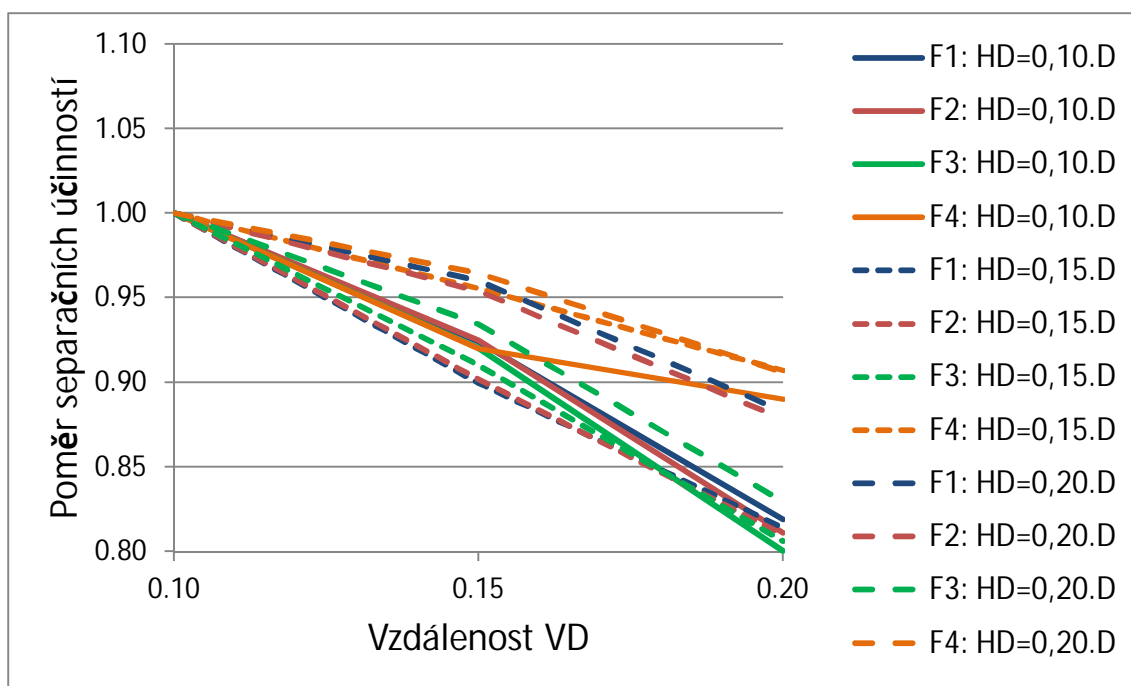
Pro ověření vlivu norné stěny na účinnost separace byly provedeny simulace, ve kterých byly částice do modelu „vpouštěny“ rovnoměrně po průtočném profilu o výšce 85 cm ode dna přívodní stoky. Vypočítané hodnoty separační účinnosti při tomto nastavení jsou uvedeny v Tab. 4.13. Při simulacích byl použit RNG k-ε model turbulence a střední výpočetní mřížka. Tato pozměněná metodika je dále v textu označována jako „metodika 2“.

Poloha norné stěny		Účinnost separace [%]			
VD	HD	F1	F2	F3	F4
0,10×D	0,10×D	16,8	17,0	31,8	97,7
	0,15×D	17,3	17,4	32,0	97,7
	0,20×D	17,2	17,4	32,3	97,6
0,15×D	0,10×D	15,5	15,7	29,3	89,9
	0,15×D	15,5	15,7	29,1	93,3
	0,20×D	16,5	16,6	30,2	94,1
0,20×D	0,10×D	13,8	13,8	25,4	87,0
	0,15×D	14,1	14,1	25,8	88,6
	0,20×D	15,2	15,3	26,8	88,4
Bez norné stěny		17,0	17,1	34,3	100,0

Tab. 4.13 Vliv polohy norné stěny na účinnost separace – metodika 2

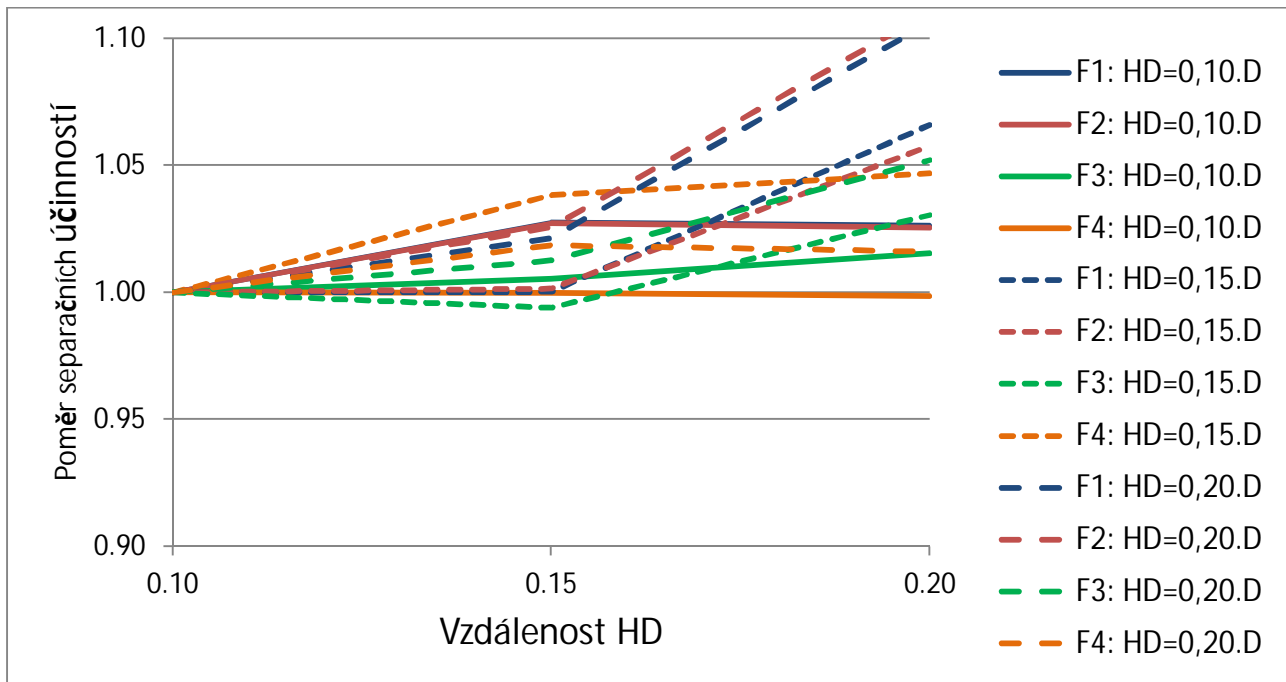
Při použití „metodiky 2“ došlo u částic frakce F1 a F2 u většiny poloh norné stěny v odlehčovací komoře ke zhoršení separační účinnosti v porovnání se stavem bez norné stěny. Stejně jako u původní metodiky bylo zaznamenáno zhoršení separační účinnosti u částic frakcí F3 a F4 ve srovnání se stavem bez norné stěny.

Na Obr. 4.6 je pomocí grafu znázorněn vliv vzdálenosti VD na separační účinnost. U částic frakce F3 a F4 je získaná závislost velmi podobná jako u předchozí metodiky. U částic frakce F1 a F2 je vliv vzdálenosti VD na separační účinnost výraznější a jednoznačnější než v předchozím případě.



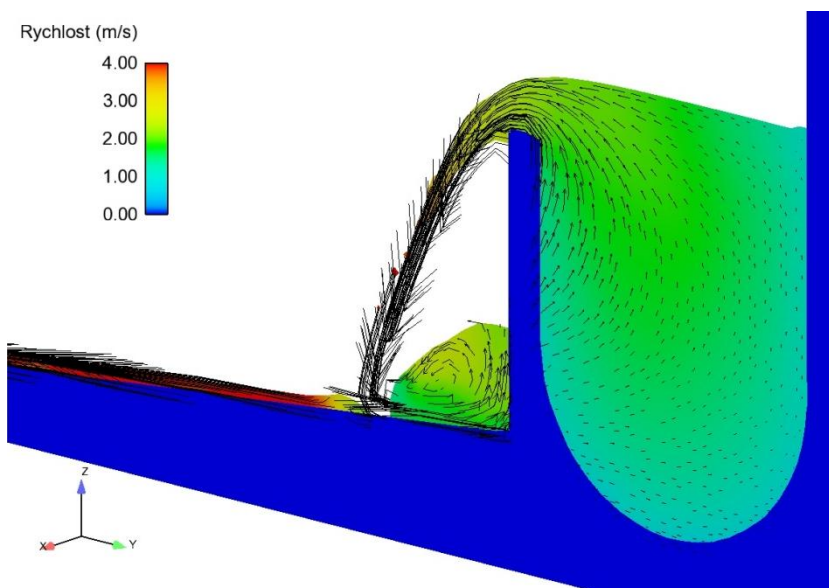
Obr. 4.6 Vliv vzdálenosti VD na separační účinnost – metodika 2

Vliv vzdálenosti HD na separační účinnost při pozmeněné metodice vpouštění částic do modelu je uveden na Obr. 4.7. U většiny frakcí částic a poloh norné stěny separační účinnost roste s hodnotou HD. Závislost částic frakcí F3 a F4 je obdobná jako u předchozí metodiky.

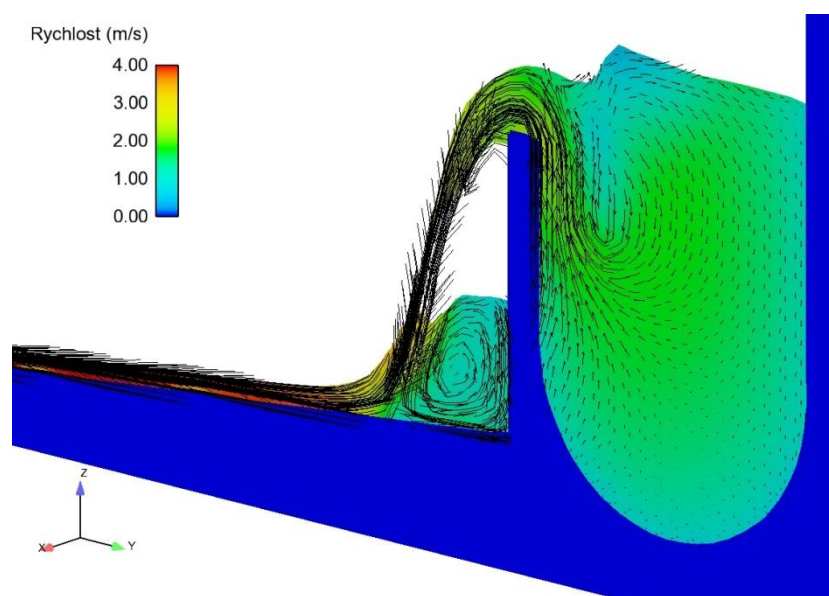


Obr. 4.7 Vliv vzdálenosti HD na separační účinnost –metodika 2

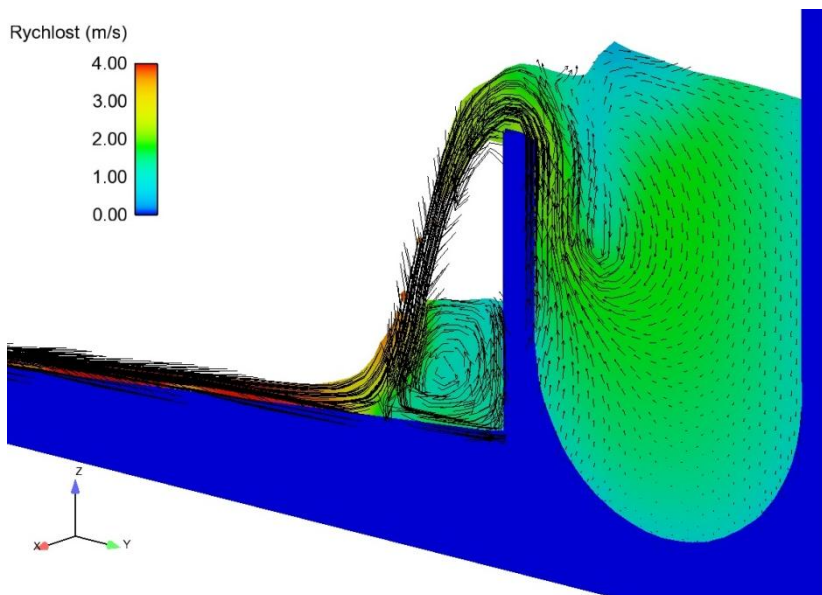
Výsledky simulací u obou použitých metodik „vpouštění“ částic do modelu indikují, že instalací norné stěny dojde ke zhoršení separační účinnosti částic frakcí F3 a F4 v porovnání se separační účinností vypočítanou bez norné stěny. Na Obr. 4.8 až Obr. 4.10 jsou zobrazeny příčné řezy středem odlehčovací komory s vyznačenými rychlostními vektory. Rychlostní pole v rovině řezu znázorněné pomocí vektorů rychlosti ukazuje, že po instalaci norné stěny je voda ze spodní části průtočného profilu „nasávána“ do mezery mezi přelivnou hranou a nornou stěnou. Tento jev se stává výraznějším s rostoucí vzdáleností VD a s klesající vzdáleností HD.



Obr. 4.8 Příčný řez středem OK – bez norné stěny

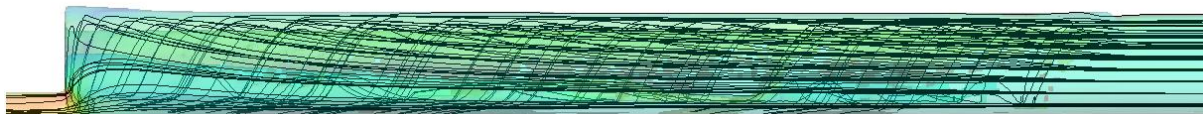


Obr. 4.9 Příčný řez středem OK – poloha norné stěny $HD = 0,15 \times D$, $VD = 0,15 \times D$

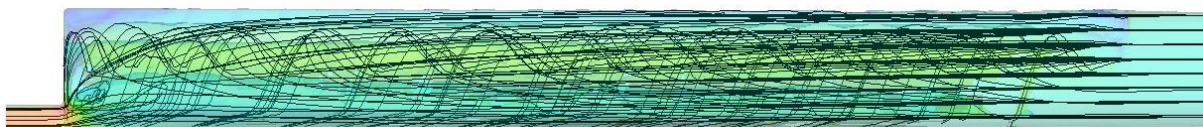


Obr. 4.10 Příčný řez středem OK – poloha norné stěny $HD = 0,15 \times D$, $VD = 0,20 \times D$

Vysvětlení rozdílných výsledků (zlepšení účinnosti separace vs. zhoršení účinnosti separace po instalaci norné stěny) u částic frakce F1 a F2 v závislosti na použité metodice lze možná nalézt v proudění v odlehčovací komoře při návrhovém průtoku. Z Obr. 4.11 a Obr. 4.12 je patrné, že norná stěna změní proudění v OK. Po instalaci norné stěny do škrťací trati proudí i voda vrstvy blízké poloze hladiny v OK. Při použití „metodiky 2“ částice frakcí F1 a F2 nejsou na vtoku do OK rozptýleny po celé výšce průtočného profilu, ale po zhruba 85 cm výšce jako byly „vpouštěny“ do modelu. U „metodiky 2“ tak vedou některé proudnice směřující do škrťací trati přes oblast, kde je žádná či minimální koncentrace částic frakce F1 a F2, což je pravděpodobně důvodem, že u této metodiky došlo k poklesu separační účinnosti po osazení norné stěny ve srovnání se stavem bez norné stěny.



Obr. 4.11 Proudnice v OK – bez norné stěny



Obr. 4.12 Proudnice v OK – norná stěna $HD=0,10 \times D$, $VD=0,20 \times D$

5 ZÁVĚR

Odlehčovací komory jsou nedílnou součástí jednotné kanalizace. Vzhledem k tomu, že odlehčovací komory představují místo přímého propojení stokové sítě s recipientem, je nutné při jejich návrhu zohlednit nejen hledisko hydraulické, ale i hledisko kvality odlehčovaných vod. V současné době je při návrhu odlehčovacích komor používáno většinou kritérium ředícího poměru. Norma ČSN EN 752 (2008) doporučuje u jednotlivých odlehčovacích komor splnit poměr ředění 1 : 5 až 1 : 8. Poměr ředění však nezohledňuje skutečnou účinnost separace znečišťujících látek.

V předkládané disertační práci byly pomocí CFD metody provedeny simulace proudění v odlehčovacích komorách s jednostranným bočním přepadem, které byly navrženy postupy pro návrh odlehčovacích komor používanými v běžné inženýrské praxi – směrnice zpracovaná firmou Hydroprojekt Praha a německá norma ATV-A 111. V simulacích byla prověřena hydraulická funkce odlehčovací komory provedením porovnání hodnot odtoku z odlehčovací komory a přepadových výšek. Porovnání i simulace byly provedeny pouze pro jednu hodnotu přítoku do odlehčovací komory. Pro zjištění účinnosti separace znečišťujících látek v odlehčovací komoře byly provedeny simulace, ve kterých znečišťující látky byly reprezentovány částicemi o zadaném průměru a hustotě.

Výsledky numerických simulací jsou závislé na řadě parametrů, přičemž k nejdůležitějším patří prostorová diskretizace. Volba délky kroku prostorové diskretizace má vliv na přesnost simulace a na časovou náročnost výpočtu. S menším krokem prostorové diskretizace se zvyšuje přesnost simulace a současně roste její časová náročnost. V předkládané práci byly provedeny simulace každé z odlehčovacích komor se třemi různými výpočetními mřížkami lišícími se velikostí výpočetní buňky; výpočetní buňky měly tvar krychle s délkou hrany L , $L/2$ a $L/4$. Délka hrany výpočetní buňky L odpovídala 1/4 průměru škrťací tratě u odlehčovací komory navržené podle směrnice a 1/3 průměru škrťací tratě u odlehčovací komory navržené podle normy ATV-A 111. Relativní odchylka vypočítaných hodnot odtoku od hodnot stanovených při návrhu byla ve většině případů do 10 %. S menší velikostí použité výpočetní buňky byla v simulacích získána vyšší hodnota odtoku z odlehčovací komory.

Relativní odchylky vypočítaných hodnot přepadových výšek od hodnot stanovených pomocí normy/směrnice byly vyšší než tomu bylo u hodnot odtoku z odlehčovací komory a větší byl i jejich rozptyl. Větší relativní odchylky i vyšší rozptyl hodnot byl zjištěn u přepadových výšek v bodě A na začátku přelivné hrany. Lepší shody vypočítaných a stanovených hodnot přepadových výšek bylo dosaženo u odlehčovací komory navržené podle normy ATV-A 111.

Dalším faktorem, který může mít vliv na přesnost numerické simulace proudění je model turbulence. V práci byly použity dva modely turbulence – $k-\varepsilon$ model a RNG $k-\varepsilon$ model turbulence. Byly provedeny simulace pro každý model turbulence a každou výpočetní mřížku. Vliv modelu turbulence na výsledky simulace nebyl zdaleka tak výrazný jaký měla velikost výpočetní buňky. Při použití RNG $k-\varepsilon$ modelu byly vypočítané hodnoty odtoku z odlehčovací komory vyšší než u $k-\varepsilon$

modelu, průměrně o cca. 2,5 %. Tento rozdíl vypočítaných hodnot odtoku z odlehčovací komory se snižoval se zmenšující se velikostí použité výpočetní buňky. Vliv modelu turbulence na hodnoty přepadových výšek byl ve většině případů minimální.

Výsledky separační účinnosti v kapitole 4.1 byly u obou odlehčovacích komor velmi podobné. Obdobně jako tomu bylo u hodnoty odtoku byly i vypočítané hodnoty separační účinnosti vyšší při použití výpočetní mřížky s menší velikostí výpočetní buňky; vyšší hodnoty separační účinnosti byly získány při použití RNG k- ϵ modelu turbulence.

Odlehčovací komory v kapitole 4.2 se odlišovaly výškou přelivné hrany i profilem přítokového potrubí. Lepší separační účinnosti bylo dosaženo u odlehčovací komory navržené podle normy ATV-A 111, u odlehčovací komory navržené podle směrnice měla na vypočítané hodnoty separační účinnosti vliv použitá metodika a vejčitý profil přítokového potrubí.

Na základě provedených simulací lze konstatovat, že poměrně dobré shody výsledků s údaji získanými postupem pro návrh odlehčovacích komor bylo dosaženo při použití střední výpočetní mřížky; rozdíl vypočítaných hodnot při použití střední a jemné výpočetní mřížky byl ve většině případů minimální. Model turbulence neměl na výsledky simulací významný vliv, při použití RNG k- ϵ modelu turbulence byla doba výpočtu delší o cca. 10 %. Lze tedy říct, že u střední výpočetní mřížky v kombinaci s k- ϵ modelem turbulence bylo dosaženo maximální efektivity ve vztahu k přesnosti simulace a časové náročnosti. Toto zjištění však nelze zobecňovat, u numerických simulací je vždy nutné provést citlivostní analýzu na hustotu výpočetní mřížky a další parametry.

Vliv polohy norné stěny na separační účinnost byl zkoumán pouze u jedné odlehčovací komory, pro jednu výpočetní mřížku, model turbulence a pro jednu hodnotu přítoku do odlehčovací komory. Byla použita odlehčovací komora navržená podle normy ATV-A 111 v kapitole 4.2. Po umístění norné stěny do odlehčovací komory došlo k navýšení hodnoty odtoku z odlehčovací komory; hodnota odtoku byla závislá na vzdálenosti norné stěny od přelivné hrany HD. Co se separační účinnosti týče, bylo zaznamenáno zhoršení separační účinnosti částic frakce F3 a F4 po osazení norné stěny. Hodnota separační účinnosti se zvyšovala s rostoucí vzdáleností norné stěny od přelivné hrany HD a klesala s rostoucí vzdáleností VD, kterou norná stěna zasahuje pod úroveň přelivné hrany. U částic frakcí F1 a F2 instalací norné stěny došlo ke zlepšení separační účinnosti v porovnání se stavem bez norné stěny v případě, kdy částice jsou přibližně homogenně rozloženy po celém průtočném profilu na vtoku do odlehčovací komory. Separační účinnost částic frakce F1 a F2 se v tomto případě zhoršovala s rostoucí vzdáleností HD, u vlivu vzdálenosti VD na separační účinnost se neprokázal jednotný trend. Při použití upravené metodiky „vpouštění“ částic do modelu, kdy částice frakcí F1 a F2 nebyly na vtoku do odlehčovací komory rozptýleny po celém průtočném profilu, došlo u těchto částic k poklesu separační účinnosti v porovnání se stavem bez norné stěny.

V tomto případě hodnota separační účinnosti částic frakce F1 a F2 rostla s rostoucí vzdáleností norné stěny od přelivné hrany HD a klesala s rostoucí vzdáleností VD.

Problematika modelování proudění v odlehčovacích komorách a modelování separační účinnosti je značně rozsáhlá a nebylo možné ji celou obsáhnout v předkládané práci. V práci bylo provedeno modelování proudění a separační účinnosti pouze při návrhovém průtoku. Z publikovaných prací řady autorů vyplývá vliv průtoku na separační účinnost. Jako další možný krok se mi jeví posoudit vliv norné stěny na separační účinnost odlehčovací komory i pro jiné hodnoty průtoků, případně i pro odlehčovací komory s různým poměrem výšky přelivné hrany k průměru přítokového potrubí.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

ATV-A 111, 1994. *Richtlinien für die hydraulische Dimensionierung und den Leistungsnachweis von Regenwasser-Entlastungsanlagen in Abwasserkanälen und -leitungen.*

BUTLER, D. a J. W. DAVIES, 2004. *Urban Drainage*. 2nd Edition. London: Spon Press. ISBN 0-203-34190-2.

ČSN EN 752, 2008. *Stokové systémy vně budov*. Český normalizační institut.

DUFRESNE, M. et al., 2009. CFD Modeling of Solid Separation in Three Combined Sewer Overflow Chambers. *Journal of Environmental Engineering*, **135** (9), s. 776-787.

HAGER, W. H., 2010. *Wastewater Hydraulics. Theory and Practice*. Second Edition. Berlin: Springer. ISBN 978-3-642-11383-3.

HLAVÍNEK, P., J. MIČÍN a P. PRAX, 2001. *Příručka stokování a čištění*. Brno: NOEL 2000. ISBN 80-86020-30-4.

HYDROPROJEKT PRAHA, 1977. *Dešťové oddělovače. Závěrečná zpráva*. Brno: Hydroprojekt Praha.

POLLERT, J. a D. STRÁNSKÝ, 2003. Combination of Computational Techniques - Evaluation of CSO Efficiency for Suspended Solids Separation. *Water Science and Technology*, **47** (4), s. 157-166.

POLLERT, J. et al., 2008. New type of CSO chamber responds to economic and ecological needs. In: *11th International Conference on Urban Drainage*. Edinburgh, s. 1-10.

PRAX, P., 2003. Technické podklady a směrnice pro návrh a provozování odlehčovacích komor. *Vodní hospodářství*, č 7.

ŽIVOTOPIS

Jméno: Tomáš Studnička
Datum narození: 29.09.1981
Národnost: česká

Vzdělání:

1988 – 1993: ZŠ Vnorovy
1993 – 2001: Purkyňovo gymnázium Strážnice
2001– 2006: VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí,
magisterské studium
2006 – 2013: VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí,
doktorandské studium

Pracovní zkušenosti:

2009 – dosud: Pöyry Environment, a.s.

Jazykové znalosti:

Anglický jazyk: pokročilý
Německý jazyk: mírně pokročilý
Ruský jazyk: začátečník

Absolvovaná školení:

FLOW-3D Hydraulic Training, Flow Science Inc.
ArcGIS Desktop, VARS, a.s.

Počítačové dovednosti:

MS Windows, MS Office, FLOW-3D, AutoCAD, MOUSE DHI, Infoworks ICM

ABSTRACT

The thesis is concerned with the use of 3D mathematical modelling for flow simulation and separation efficiency in a single side weir CSO chambers. Analysis of the effect of turbulence model and computational grid on simulation results has been carried out in order to maximize the efficiency of numerical simulations. The goal of the thesis is to examine the effect of scum board position on separation efficiency of a single side weir CSO chamber.

ABSTRAKT

Práce je zaměřena využití třídimenzionálního matematického modelování pro simulaci proudění a separační účinnosti v odlehčovacích komorách s jednostranným bočním přepadem. V práci je provedena analýza vlivu modelu turbulence a výpočetní mřížky na výsledky simulací s cílem maximalizování efektivity numerických simulací. Cílem disertační práce je prověření vlivu umístění norné stěny na hydroseparační účinnost odlehčovací komory s bočním přepadem.