

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STAVEBNÍ**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**HYDRAULIKA NÍZKÝCH
KANALIZAČNÍCH SPADIŠŤ**

2021

DAVID KOLÁŘ

Název práce: Hydraulika nízkých kanalizačních spadišť

Autor: David Kolář

Katedra: K141 Katedra hydrauliky a hydrologie

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vojtěch Bareš, Ph.D.

e-mail vedoucího: baresvoj@cvut.cz

Abstrakt Tato bakalářská práce se zabývá posouzením hydrauliky nízkých kanalizačních spadišť.

Teoretická část práce obsahuje popis základních kritérií návrhu kanalizačních spadišť a vstupních parametrů pro jejich návrh. Tato část práce vychází z publikovaných výzkumů a hydraulických poznatků od českých a zahraničních autorů. Také je zde uveden soubor vzorců a postupů pro návrh nízkého spadiště s přímým nátokem. Praktická část této práce obsahuje případové studie, ve kterých jsou posouzena spadiště připravovaná pro jednotný kanalizační systém hlavního města Prahy. V přílohách této práce jsou modely posuzovaných spadišť z případových studií vymodelované ve 3D. Tyto 3D konstrukční modely jsou připraveny pro budoucí použití do CFD modelu.

Klíčová slova: hydraulika, nízký spád, přímý nátok, spadiště, trajektorie paprsku

Title: Hydraulics of low sewer drop shafts

Author: David Kolář

Department: K141 Department of Hydraulics and Hydrology

Supervisor: Ing. Vojtěch Bareš, Ph.D.

Supervisor's e-mail address: baresvoj@cvut.cz

Abstract Presented bachelor's thesis deals with the assessment of the hydraulics of low sewer drop shafts.

The theoretical part of the work contains a description of the basic criteria for the design of sewers drop shafts and input parameters for their design. This part of the work is based on published research and hydraulic knowledge of Czech and foreign authors. There is also a set of formulas and procedures for designing a low sewer drop shafts with a direct inlet. The practical part of this work contains case studies in which the sites designed for a combined sewer system of the capital city of Prague are assessed in the appendices of this work. 3D construction models of assessed sewer drop shafts from case studies were created. These 3D construction models are ready for future use in the CFD model.

Keywords: hydraulics, drop shaft, direct inflow, low gradient, water jet geometry

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kolář Jméno: David Osobní číslo: 476974
Zadávající katedra: Katedra hydrauliky a hydrologie
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Hydraulika nízkých kanalizačních spadišť

Název bakalářské práce anglicky: Hydraulics of low sewer drop shafts

Pokyny pro vypracování:

Rešerše a kategorizace typů spadišť, rešerše dat z výzkumu spadišť s přímým nátokem, rešerše základních kritérií návrhu a vstupních parametrů pro návrh.

Zpracování typových návrhových výpočetních postupů a jejich aplikace na existujících lokalitách na území HMP.

Zpracování 3D konstrukčního modelu pro budoucí implementaci do CFD modelu.

Seznam doporučené literatury:

HAGER, Willi H. Wastewater Hydraulics: Theory nad Practice. 2. vydání. Berlín: Springer, 2010. ISBN 978-3-642-11382-6.

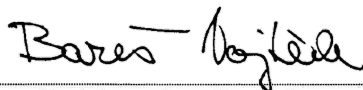
GRANATA, Francesco; DE MARINIS, Giovanni; GARGANO, Rudy; HAGER, Willi H. Hydraulics of Circular Drop Manholes. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 137(2), 2010.

CHANSON, Hubert. Hydraulics of Rectangular Dropshafts. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol. 130, 2004.

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Vojtěch Bareš. Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 19.2.2021 Termín odevzdání bakalářské práce: 16.5.2021

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku



Podpis vedoucího práce



Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

22.2.2021

Datum převzetí zadání



Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů.
Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne 16. května 2021

.....
David Kolář

Poděkování patří společnosti Sweco Hydroprojekt a.s. konkrétně pánům Doc. Ing. Vladimírovi Havlíkovi, Ing. Martinu Pikalovi, Ing. Vítovi Kučerovi a Janu Kamenickému za poskytnutí potřebných pokladů a hodnot pro vytvoření čtvrté kapitoly Případové studie.

OBSAH

Abstrakt	3
Zadání práce	7
Zadání práce	8
1 Úvod	3
1.1 Motivace	3
1.2 Cíle	4
2 Literární rešerše	5
2.1 Kanalizační spadiště	5
2.1.1 Základní typizace	6
2.2 Konstrukční rozdělení	7
2.2.1 Spadiště s přímým nátokem	7
2.2.2 Soustava spadišť	8
2.3 Přítokové potrubí	9
2.4 Nátok na spadiště	10
2.5 Spadišťová šachta	11
2.6 Tlumení mechanické energie	12
2.7 Odtokové potrubí	13
3 Hydraulický návrh a posouzení	14
3.1 Přítokové potrubí	14
3.2 Nátok na spadiště	16
3.3 Spadišťová šachta	17
3.4 Tlumení mechanické energie	19
3.5 Odtokové potrubí	20
4 Případové studie	21
4.1 Kruhové spadiště Karlín s obtokovým potrubím	22
4.1.1 Mezní průtok Q_{mez}	23
4.1.2 Beztlakový kapacitní průtok Q_{bkap}	25
4.1.3 Shrnutí	26
4.1.4 Závěr	27
4.2 Spadiště Rumunská s obtokovým potrubím	28
4.2.1 Bezdeštný průtok Q_{spl}	29
4.2.2 Mezní průtok Q_{mez}	31
4.2.3 Průtok nezahlceného odtoku Q_{no}	32

4.2.4	Beztlakový kapacitní průtok Q_{bkap}	33
4.2.5	Shrnutí	34
4.2.6	Závěr	35
4.3	Spadiště Miranova bez obtokového potrubí	36
4.3.1	Beztlakový kapacitní průtok Q_{bkap}	37
4.3.2	Průtok nezahlceného odtoku Q_{no}	39
4.3.3	Analýza rozkolísanosti průtoků	40
4.3.4	Závěr	42
5	Závěr	43
	Seznam použitých značek a symbolů	44
	Seznam použité literatury a zdrojů informací	46
	Seznam použitého softwaru	48
	Seznam obrázků	49
	Seznam tabulek	50
	Seznam příloh	51
	Příloha A	52
	Příloha B	53
	Příloha C	54
	Příloha D	55
	Příloha E	56
	Příloha F	57

1.1 Motivace

Na stokové síti je řada objektů, z nichž každý plní svoji specifickou funkci. Dispozice stokové sítě a objektů je dána řadou faktorů, kromě jiného i spádovými podmínkami. Při potřebě překonávat výškový rozdíl na stokové síti vzniká mechanická energie, kterou je zapotřebí utlumit. Při malém sklonu a spádu je energie tlumena třením o stěny kanálu. Pokud je sklon dna větší než sklon stoky při maximální možné průřezové rychlosti, je tlumení řešeno pomocí spadiště s vývarem nebo tlumící komorou [1]. V tomto objektu vznikne prostor pro dostatečné utlumení kinetické energie vody a vytvoření vhodných hydraulických podmínek na odtoku v navazujícím potrubí. Dostatečné utlumení kinetické energie přispívá ke spolehlivosti a trvanlivosti celého kanalizačního systému.

Každý objekt na stokové síti je již po mnoho let předmětem zkoumání. Jejich nesprávný návrh a provedení může představovat i jistá rizika nežádoucího hydraulického chování za různých provozních stavů. Snahou je toho chování v předstihu odhalit a přizpůsobit tak technický návrh, který by rizika eliminoval. Zvýšený průtok a nedostatečná disipace kinetické energie společně s velkým provzdušněním proudu v objektu může způsobovat nežádoucí přítomnost bystřinného proudění nebo tlakového režimu proudění v odtoku. V objektech může působit problémy dvoufázové proudění *voda - vzduch*.

Spadiště jsou často využívaným objektem, ale doposud nebyly podrobně a systematicky zkoumány [6][13]. Stále aktuálním tématem je vhodné vyřešení nového objektu spadiště ještě před jeho vybudováním a jaké k tomu použít vstupní parametry. Jak se zmiňuje Hager W. [9]: Ze zkušenosti plyne, že mnoho spadišť má slabou schopnost tlumení energie a tato skutečnost je přičítána hlavně nevhodnému návrhu zahrnující nedostatečné rozměry.

Metodické pokyny na území České republiky existují pouze jako Městské standardy publikované jednotlivými městy. Ve všech podkladech pro návrh spadišť je citována Česká technická norma ČSN 75 6101 - *Stokové síť a kanalizační přípojky*. Ta je souborem doporučení, které je vhodné respektovat. Jednotlivá města a správní celky proto mají své standardy pro kanalizační síť a stoky. Jejich dodržení je vyžadováno správcem a provozovatelem dané stokové sítě. Spadišřové šachty by měly být navrženy tam, kde vlivem konfigurace terénu vychází velké podélné sklony potrubí, resp. rychlosti v potrubí překračující maximální rychlost $v = 5 \text{ m/s}$ [1][23][25][26]. Jak uvádí Standardy hl. m. Prahy [26] je zapotřebí vybudovat spadiště v místě, kde při výstavbě hornickým způsobem dojde k překročení

předpisů ČBÚ¹ o maximálním povoleném sklonu ražby. Další uplatnění spadiště nastává při potřebě snížit kinetickou energii dopravované odpadní vody ve stokovém systému. Spadišťovou šachtu lze použít ke změně směru stoky v takovém úhlu, který neumožňují šachetní dna ani vhodné oblouky u velkých profilů.

Kanalizační spadiště malého spádu jsou spadiště, ve kterých je vertikální rozdíl přítokové a odtokové stoky mezi 3 - 5 m. U tohoto typu spadišť se doporučuje kombinace s přímým nátokem. Přímý nátok je pro malé spády preferován díky ekonomičtějšímu a snazšímu řešení. U této konfigurace není zapotřebí tlumit energii vody na stěnách vertikální šachty. Vhodnost použití tohoto typu spadiště se uvádí na základě výšky stupně, který je menší než 7 m, případně do 10 m. V parametru maximální výšky stupně se literatura značně rozchází. Ve své knize Hager W. [9] uvádí jako maximální výšku spadiště s přímým nátokem 7 m. Do této výšky můžeme navrhovat pouze pomocí matematických vztahů bez použití fyzikálního modelu. Naproti tomu Městské standarty pro hl. m. Prahu [26] uvádějí, že až od výšky 12 m je zapotřebí k návrhu přistupovat individuálně a použít model v laboratoři.

Motivací k vytvoření této práce se zkušeností z pozice projektanta je skutečnost, že neexistuje ucelený soubor parametrů pro návrh spadišť s malým spádem. Hlavní myšlenka, která mě přivedla na zpracování práce o spadištích malého spádu, byl vágní a nepřilíš vhodný přístup k problematice uvedený v Městských standardech platných na území hl. m. Prahy. V těch jsou publikovány vzorové příčné řezy s „odrazovým můstkem“ proti stěně, kdy při větším průtoku dojde k nevhodnému rozstříku paprsku splaškové vody o protilehlou konstrukci se vznikem velkého množství nebezpečného aerosolu.

1.2 Cíle

Práce se zaměřuje na hydrauliku spadišť malého spádu s přímým nátokem na jednotné stokové síti. S ohledem na toho vymezení jsou cíle práce tyto:

- Literární rešerše a hydraulické řešení z podkladů pro návrh na území ČR.
- Aplikace návrhových výpočetních postupů na existující lokality na území HMP.
- Vzorový postup pro návrh spadiště malého spádu s přímým nátokem.

¹Český báňský úřad

LITERÁRNÍ REŠERŠE

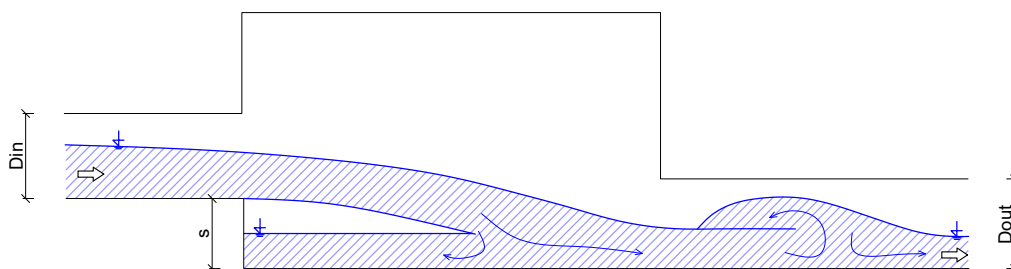
2.1 Kanalizační spadiště

Spadiště je objekt sloužící k překonání hydraulického spádu v podélném profilu stoky. Spadiště navrhujeme v případě, kdy uvažovaný podélný sklon stoky vede k překročení maximální přípustné rychlosti stanovené na 5 m/s, dle normy ČSN 75 6101 [1]. Dlouhodobě vysoké rychlosti mohou způsobit narušení trubního materiálu stoky a povedou ke zkrácení životnosti stavby. Další problém představuje změna hydraulického režimu proudění. Změna sklonu a přechod z bystřinného režimu do režimu říčního vede k lokálnímu vyrovnání energetických horizontů vznikem vodního skoku. Jeho lokalizace je při měnícím se průtoku obtížná. Především s průtokovou variabilitou za deště se vodní skok pohybuje a může docházet i k zahlcení průtočného profilu a změně režimu proudění na tlakové [14].

Spadiště snižuje podélný sklon stoky, čímž redukuje rychlost proudění v navazujících úsecích stokové sítě. K disipaci energie může docházet dopadem paprsku na dno šachty nebo prouděním po stěně. Takto uklidněný proud odtéká odtokovým potrubím dále do stoky.

Za spadiště nelze považovat objekt stupně ve dně, i když nastává rozdíl nivelety přítoku a odtoku, viz. Obrázek 2.1. Definici stupně ve dně zavedl De Martino F. [17] pomocí Rovnice 2.1, kde s je výška stupně, D_{out} je průměr/výška odtokového potrubí objektu. Takový objekt nebude v této práci řešen.

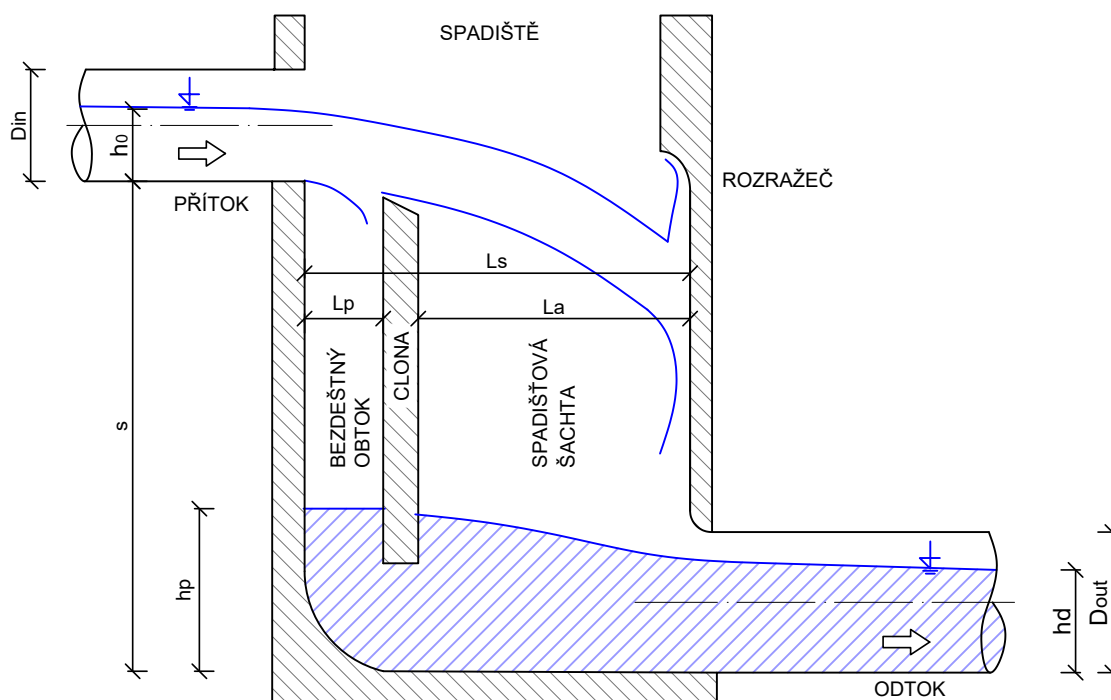
$$\frac{s}{D_{out}} \leq 1 \quad (2.1)$$



Obrázek 2.1: Stupeň ve dně

2.1.1 Základní typizace

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, tato práce se nezabývá stupněm ve dně. Obrázek 2.2 ukazuje vzorový řez kanalizačním spadištěm malého spádu s přímým nátokem [9], na který je práce zaměřena. Parametrem kategorizace je podle literatury výška stupně ve dně objektu, která nepřesahuje hranici 7 m, ojediněle pak do 10 m. Při nutnosti překonat vyšší spád je doporučeno použít jinou konstrukci kanalizačního spadiště, která energii tlumí efektivněji.



Obrázek 2.2: Vzorový řez spadištěm, upraveno [9]

Vymezení pojmů

spadiště - stavební objekt stokové sítě

přítokové potrubí - slouží k přivedení průtoku k objektu spadiště

bezdeštný obtok - zaručuje převedení průtoku neovlivněného srážkovou událostí

clona - je další možností k oddělení bezdeštného průtoku, může sloužit i jako rozdělovací prvek proudu

spadišťová šachta - převádí návrhový průtok a musí mít dostatečné rozměry

uklidňovací komora - prostor sloužící k disipaci energie a odtoku do odtokového potrubí

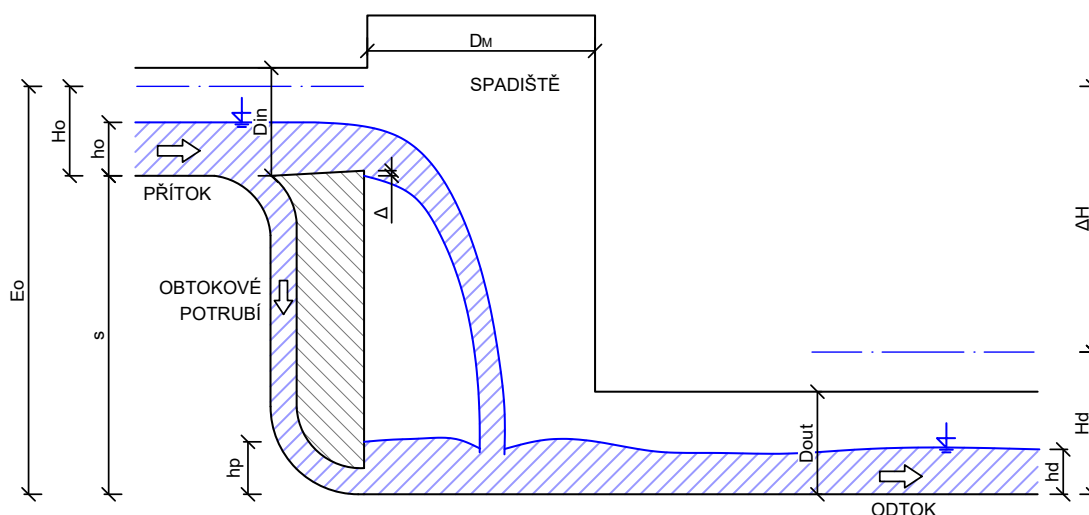
rozražeč - je jednou z možností jak část energie utlumit a zamezit rozstříku paprsku

odtokové potrubí - výustní prvek objektu, kde dochází k napojení na stokovou síť

2.2 Konstrukční rozdělení

2.2.1 Spadiště s přímým nátokem

Spadiště s přímým nátokem má ověřenou bezpečnou funkčnost pro výšky stupně 7-10 m. Pokud je přímý nátok použit pro větší spád, bude při volném pádu paprsku docházet ke vnikání vzduchu do paprsku a vzniku provzdušněného proudění. Toto je nežádoucí jev a pro takové spády je vhodné použít spadiště jiné konstrukce. U spadiště s přímým nátokem nedochází před objektem ke změně směru přírodního potrubí. Objekt na jednotné kanalizaci musí být bezpečně použitelný na celou škálu rozkolísaných průtoků, proto Městské standardy [23][25][26] požadují konstrukční řešení i pro převedení bezdeštného průtoku. Vybudování obtoku je vhodné z hygienického důvodu a z hlediska omezení zápachu a hluku. Nicméně samotná volba provedení obtokového potrubí je většinou na provozovateli dané stokové sítě. Stanovení bezpečnosti stokové sítě pro návrhové N-leté deště N2, N5, N10 je jednoznačné a může se k ověření využít i simulační model generelu odvodnění. Hydraulickou funkci spadiště k těmto průtokům nelze přímo vztahovat. Nicméně tímto problémem bude třeba se systematicky zabývat.

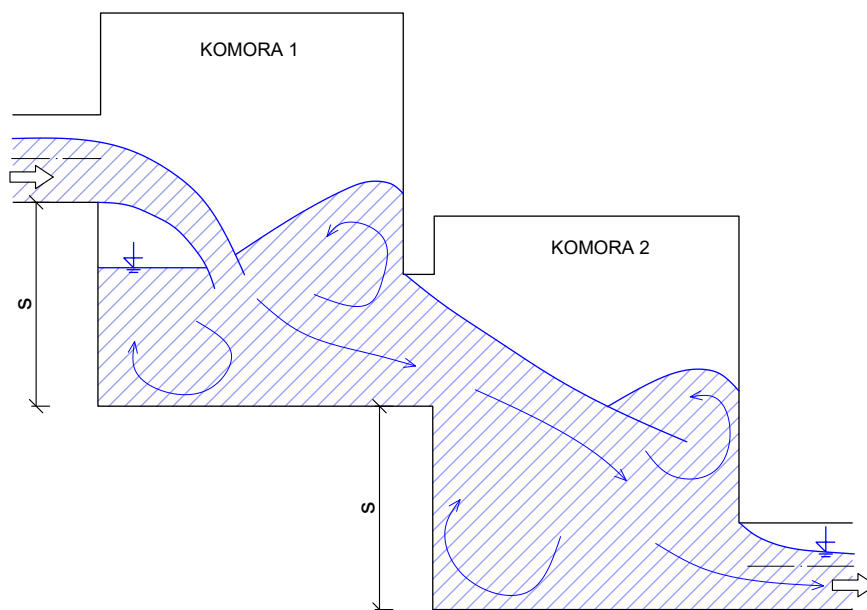


Obrázek 2.3: Spadiště s přímým nátokem a obtokovým potrubím, upraveno [26]

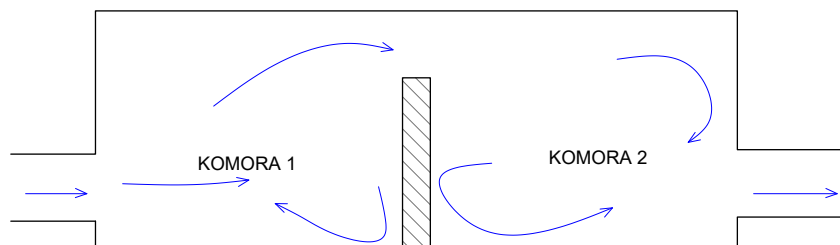
Obrázek 2.3 zobrazuje svislý řez spadištěm profilu DN 250-600 mm podle podkladů z Městských standardů hl. m. Prahy [26]. Ty požadují použití obtokového potrubí pro převedení splaškových nebo malých průtoků, nicméně velikost těchto průtoků není podrobněji specifikována. Tuto hodnotu lze s nejmenším ovlivněním chyby získat statisticky z naměřených průtoků během monitorovací kampaně. Za odpovídající malé přítoky je možno považovat takový průtok obsahující i balastní vody (Q_{spl}), který se celý vejde do obtokového potrubí. O nevhodnosti vzorového spadiště podle Městských standardů Prahy informuje Havlík V. [10]. Upozorňuje, že již při průtoku Q_{spl} může docházet k nežádoucímu rozstříku přítokového paprsku o hranu obtokového potrubí. Celé situaci ani nepomáhá horizontální navýšení přelivné hrany spadiškové komory oproti přítokovému potrubí minimálně o 100 mm [10]. Z toho vyplývá vhodnější použití tenké stěny viz. Obrázek 2.2, která vytvoří ostrohannou dělící hranu a rozdělí paprsek při $Q > Q_{spl}$ v prostoru spadiškové komory. K těmto závěrům došli i další autoři, například Hager W. [9] a Granata F. et al. [6].

2.2.2 Soustava spadišť

Soustavu více spadišť malého spádu vybudovaných za sebou a tvořící kaskádu je možno použít pro překonání výškového rozdílu většího než 10 m. Bohužel toho řešení je prostorově náročné a jeho použití není možné za každé situace. Kaskáda spadišť může být ekonomičtější variantou oproti použití spadiště s tangenciálním nátokem, kde bude docházet k velkému zahloubení a množství výkopových prací [3]. V intravilánu mohou způsobovat problémy již existující inženýrské sítě. Soustava spadišť byla inspirací pro dizertační práci Camino Zapata G. [21], kdy ve své práci navrhla a popsala dvoukomorové spadiště s příčnou stěnou uvnitř viz. Obrázek 2.4. V půdoryse osa přítokového a odtokového potrubí není shodná s osou propojovací mezery obou komor, tím vzniká delší dráha a prostor pro utlumení energie proudu, viz. Obrázek 2.5.



Obrázek 2.4: Dvoukomorové spadiště, řez, upraveno [21]



Obrázek 2.5: Půdorys dvoukomorového spadiště

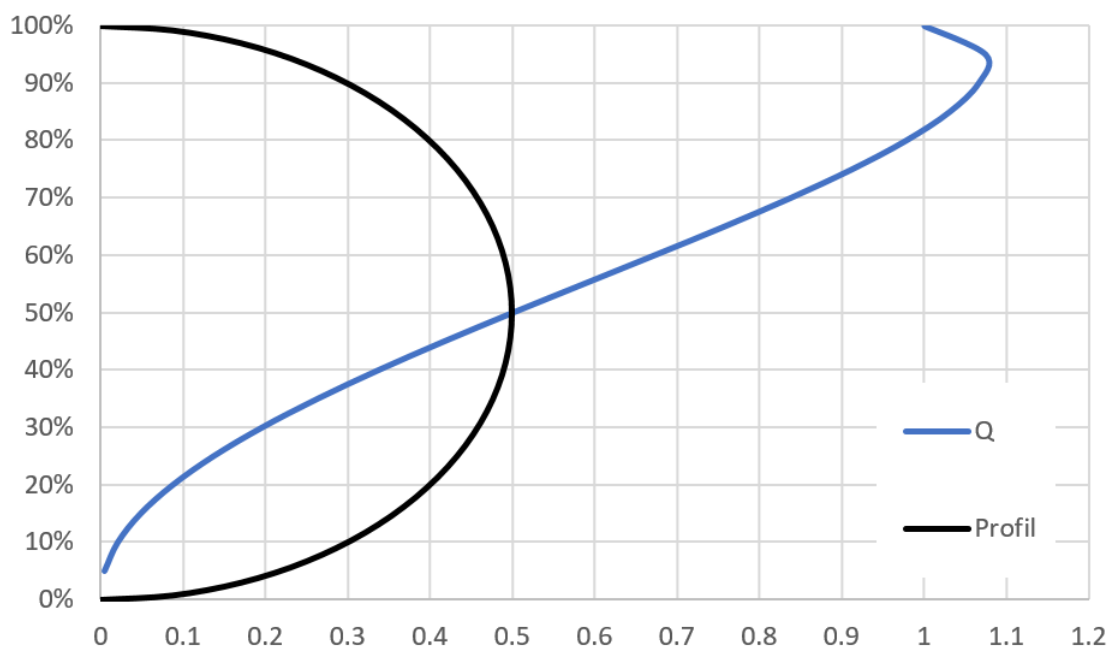
Tento svůj návrh podložila laboratorním výzkumem na univerzitě v Albertě a následně v Edmontonu došlo k aplikaci jejích poznatků na kanalizační síti. Byla vybudována soustava pěti dvoukomorových spadišť pro překonání celkového spádu 50 m. Zjistilo se, že k disipaci většiny energie dochází už v první komoře a druhá slouží spíše jako uklidňovací, aby nedocházelo k šíření energie dále do sítě. Dojde-li k zahlcení v odtokovém potrubí, nastane plnění druhé komory a to zpětně ovlivní chování proudu v první komoře. Nicméně k bližšímu zkoumání soustavy spadišť v této práci nedochází.

2.3 Přítokové potrubí

Je vhodné, aby proudění na přítoku splňovalo určité požadavky. Ideální je i jednotný sklon v minimální délce $20D_{in}$, kde D_{in} je průměr přítokového potrubí. V potrubí by se měl nacházet stabilní režim proudění za všech průtokových stavů [2]. Specifika proudění na přítoku ovlivňují parametry potrubí. Parametry, které jsou zapotřebí znát pro popsání vlastností proudu, jsou průtok Q , průměr potrubí D , Manningův drsnostní součinitel n a sklon dna přítokového potrubí i_{in} . Výsledkem rovnic je hloubka rovnoměrného proudění h_0 a kritická hloubka h_k . Froudovo číslo určené z průtoku a vlastností potrubí ukáže, zda se jedná o bystřinné nebo říční proudění. Režim proudění v přítokové stoce musí být pro celou škálu průtoků neměnný, nelze dopustit, aby při nějakých průtocích vznikl vodní skok. Sklony potrubí v místě, kde se spadiště navrhuje, odpovídají bystřinnému režimu proudění. To je preferováno, neboť hydraulická kapacita stoky stejného průměru je při bystřinném proudění vyšší než při proudění říčním.

Aby nedocházelo k tlakovému proudění v přítokové stoce musí být splněna podmínka částečného plnění kruhového potrubí. Obrázek 2.6 popisuje průtok při částečném plnění kruhového potrubí o průměru $D = 1$ m. K maximálnímu průtoku dochází okolo 95 % zaplnění průřezové plochy potrubí. Poměrné plnění y_0 vyjadřuje Rovnice 3.3, kde h_0 je hloubka rovnoměrného proudění v přítokové stoce a D_{in} je její průměr [4].

$$y_0 = \frac{h_0}{D_{in}} \quad (3.3)$$



Obrázek 2.6: Graf částečného plnění kruhového průřezu potrubí

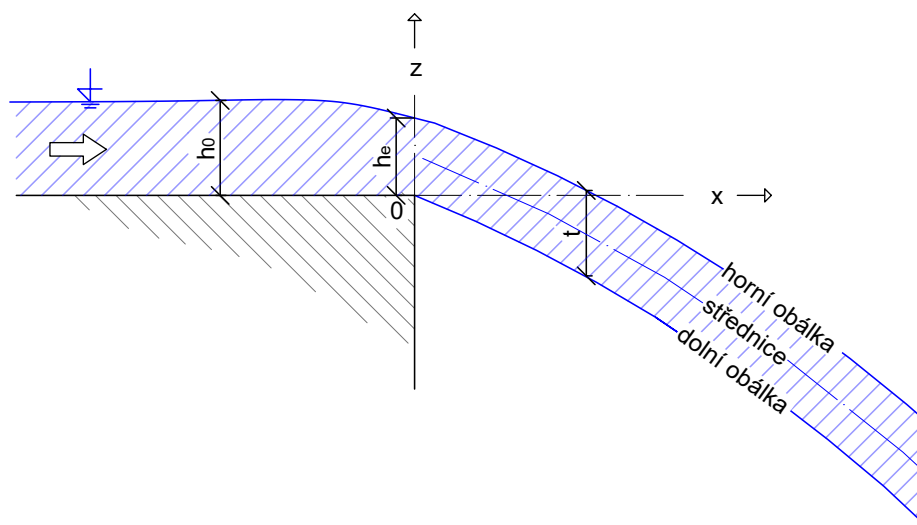
Stejné postupy a vztahy se využijí i při posouzení beztlakového proudění odtokovým potrubím. Za průměr přítokového potrubí D_{in} bude dosazen průměr odtokového potrubí D_{out} .

2.4 Nátok na spadiště

Tvarové řešení nátoku na spadiště s přímým nátokem může být rozmanité. Podle některých studií je vhodné na přeliv umístit rozražeče, což příznivě ovlivní množství utlumené energie, ale má negativní vliv na množství vzduchu obsaženého ve vodě - *provzdušněné proudění* [12]. Další možností úpravy přelivné hrany je podle některých autorů použití vhodně zaoblené proudnicové plochy [9]. Tvar beztlakové proudnicové přelivné plochy vychází z tvaru trajektorie spodní obálky výtokového paprsku do volna z kruhového potrubí viz. Obrázek 2.7 [2]. Hager W. [9] k popsání trajektorie paprsku použil bezrozměrné souřadnice horizontální X a vertikální Z .

$$X = \frac{x}{h_0} \cdot Fr^{-0.8} \qquad Z = \frac{1}{3}X + \frac{1}{4}X^2 \qquad (3.9)$$

Kde je x - souřadnice výtokového paprsku od konce přítokového potrubí, h_0 - hloubka rovnoměrného proudění v přítokovém potrubí, Froudovo číslo $Fr = Q/(g \cdot D_{in} \cdot h_0^4)^{1/2}$.



Obrázek 2.7: Přepadový paprsek, upraveno [9]

Další možností jak popsat trajektorii paprsku, jsou vzorce teoretického tvaru výtokového paprsku x a y , které vycházejí z principu šikmého vrhu.

$$x = v_0 \cdot t \cdot \cos\delta \qquad y = v_0 \cdot t \cdot \sin\delta - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \qquad (2.2)$$

Kde v_0 - přítoková rychlost, t - čas měření, g - tíhové zrychlení a δ - sklon stoky, neboli úhel svírající vektor rychlosti s vodorovnou osou x [15].

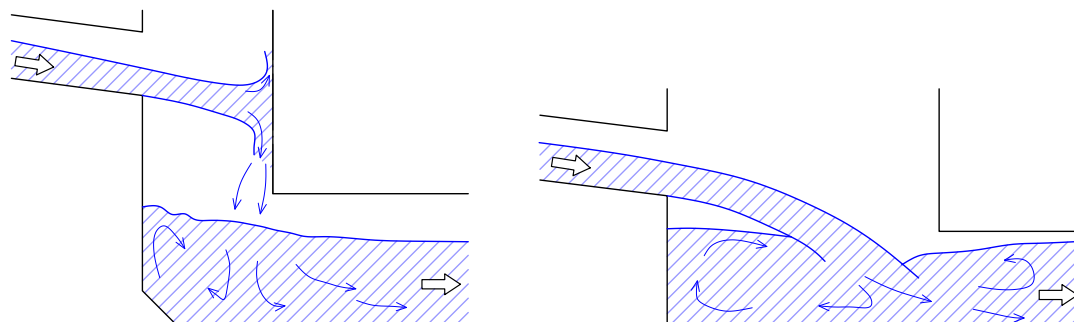
Tvar paprsku se liší podle výtokového otvoru. Pokud se jedná o kruhové potrubí, tak tloušťka paprsku po jeho dráze roste. V případě obdélníkového tvaru otvoru je tloušťka téměř konstantní až do dopadu na dno. Tlakové poměry také ovlivňují tvar paprsku, za sníženého tlaku dochází ke snížení trajektorie.

2.5 Spadišřová řachta

Spadiřřovř řachty jsou pravořhlř nebo kruhovř, v ojedinřlřch přřpadech lze pouřřt individuřlnř tvarovř řeřeni. Ve vystrojenř a uspořřadřnř vnitřku spadiřřovř řachty se podklady neshodujř. Jednřm z vřaznřch rozdřlř je řeřeni bezdeřřnřho nebo malřho přřtoku Q_{spl} . V Standardech pro hl. m. Prahy je pořřadovřno instalovat obtokovř potrubř, od kterřho lze upustit jen ve zdřvodnřnřch přřpadech [26]. Naopak Standardy mřřta Brna pořřadujř osazenř obtokovřho přřlřblřku a od profilu přřtokovřho potrubř DN 600 přřdřnř dřlicř stěny [23]. Norma v tomto přřpadech doporuřuje osazenř trubnřho obtoku na stoce od jmenovřtř svřtlosti DN 300 [1]. Dalřřm řdajem, kde se podklady rozchřzejř, je vřřka spadiřřovřho stupnř od kterřho je doporuřenř individuřlnř posouzenř.

Mořnost vřby přřvedeni bezdeřřnřho přřtoku vřřinou urřuje provozovatel stokovř sřř, např. PVS¹ pořřaduje osazenř obtokovřho potrubř tzv. „fajřky“. Za fajřku lze povařovat samostatnř potrubř mimo spadiřřovř prostor s minimřlnř svřtlostř DN 400 s pouřřtřm obloukř mřřsto kolen. Nicmřnř vřce autorř odbornř literatury doporuřuje pouřřt dřlicř stěny. Vybudovřnř dřlicř stěny namřřsto obtokovřho potrubř pro přřvedeni bezdeřřnřch přřtokř mřřže břt v mnoha přřpadech ekonomičtřřřm. V nřkterřch přřpadech mřřže dochřzet k zachytřvřnř hrubřch neřřstot na ostrř hraně dřlicř stěny. K rozdřlenř proudu slouřř ostrř hrana stěny, kterř zaruřř hydraulicky vhodnř rozdřlenř proudu [6][9][10].

Protřřř stěna spadiřřovř řachty musř břt dostatečně opevnřna, aby nedochřzelo k jejř degradaci vřivem dopadu oddřlenřho proudu nebo celřho paprsku přř velkřch přřtocřch. Za vhodnř materiřly lze povařovat takovř, kterř jsou odolnř proti oterř a agresivnřmu přřstředř, za kterř stokovř sřř jednoznačně povařujeme. Disipace energie a redukce rychlosti je provřdřna třenřm o protřřř stěnu spadiřřtř a rozstřřkem letřcřho proudu o stěnu.



Obrřzek 2.8: Spadiřřovř řachta, upraveno [9]

Obrřzek 2.8 ilustruje rozdřlnř chovřnř proudu ve spadiřřovř řachtě. Levř obrřzek ukazuje chovřnř přř vřřřřm stupnř s a menřřm přřmřru řachty D_M , kde voda dopadř na protřřř stěnu a stěkř po nř dolř. Pravř obrřzek naopak s menřřm stupnřm s přř vřřřřm přřmřru D_M , kde voda dopadř na dno řachty a do objemu vody v nř. Dispozice s vřřřřm stupnřm s je preferovřnřm přřpadem vřhledem k lepřřmu utlumenř energie a s menřř pravdřpodobnostř vzniku typu prouděnř R I-R2. Dřvod proř dochřzř k efektivnřřř disipaci energie je popsřno v dalřř Kapitole 2.6.

Kapacita řachetnřho prostoru je dostatečně, ve vřřřřnřch přřpadech je dokonce vřřř nřř samotnř kapacita stokovř sřř pro beztlakovř prouděni. Omezujřcřm faktorem odtoku ze spadiřřtř je přřechod z řachty do odtokovřho potrubř, kde dochřzř vřivem zřřnenř a vtokem do potrubř k mřřstnřm ztrřtřm a ztrřtř mechanickř energie. Hydraulicky tomuto jevu odpovřdř teorie propustkř, kdy za zatopenř vtok je mořno povařovat vřdrtou hladinu v řachtě. Pro bilanci mechanickřch energiř v řachtě a v odtokovřm potrubř se vyuřřje Bernoulliho rovnice [24].

¹Prařskř vodohospodřřřskř spoleřnost a.s.

2.6 Tlumení mechanické energie

Tlumení mechanické energie proudu je základní funkcí spadiště, která je popsána hydraulickým spádem objektu. Základním hodnotícím parametrem účinnosti tlumení je rovnice,

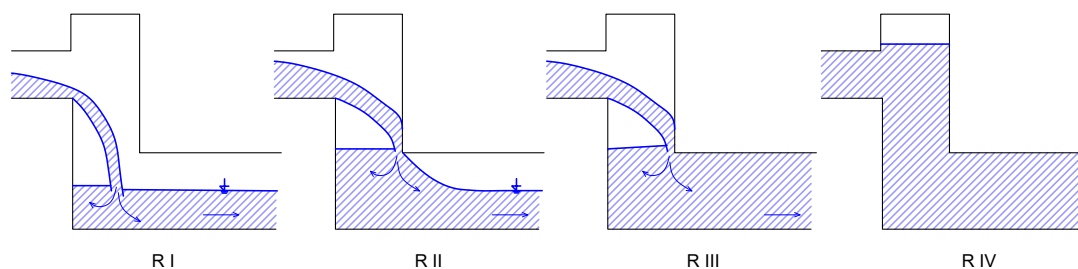
$$\eta = \left(1 - \frac{H_d}{E_0}\right) \quad (3.23)$$

kde E_0 a H_d jsou polohy čáry energie vztažené ke srovnávací rovině. K utlumení energie by mělo docházet minimálně z 80–85 % [9]. Pokud nelze dosáhnout uspokojivého utlumení energie, je možno zahлубit dno šachty. Tím vznikne vývar, který vychází z principu tlumení kinetické energie u otevřených koryt [13]. Nicméně toto řešení se nedá využít na stokové síti, neboť ve vývaru bude docházet k nežádoucí sedimentaci. Patentový spis Haindla K. [12] upozorňuje na možné samovolné utlumení kinetické energie osazením rozražeče vodního proudu na vtok a odrazníku na protilehlé stěně.

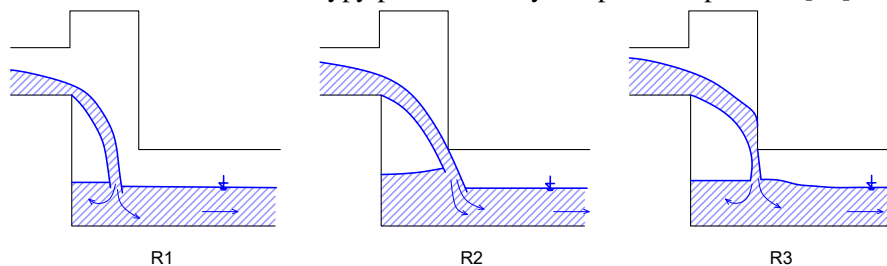
Předpoklady k tlumení energie popisují ve svých pracích autoři Camino G. [3], Granata F. [6] a Zhao C. [22]. Z jejich výzkumu vzešla klasifikace typů proudění ve spadištích.

Obrázek 2.9: R I, volný přepadový paprsek; R II, výtok otvorem; R III, tlakový odtok; R IV, plně zatopený prostor šachty [16].

Obrázek 2.10 zobrazuje podtypy typu R I.



Obrázek 2.9: Základní typy proudění vody ve spadišti, upraveno [16]



Obrázek 2.10: Podtypy R I proudění vody ve spadišti s volnou hladinou, upraveno [5]

- *R1-R1* - přepadající voda dopadá na dno šachty
- *R1-R2* - přepadající voda padá přímo do vstupu odtokového potrubí a odtéká
- *R1-R3a* - voda dopadá na protilehlou stěnu spadiště, částečně se odráží a z části padá po stěně do dolní vody, kde tvoří clonu nad odtokovým potrubím, která omezuje odtok z prostoru spadiště
- *-R3b* - voda naráží na protější zeď v téměř stejné výšce jako je výška přítoku.

Typy R II, R III, R IV jsou ovlivněny podmínkami na odtoku. Tento typ klasifikace je zaměřen pouze na efektivitu tlumení přebytečné energie mezi přítokem a odtokem a zcela zanedbává detailní procesy. Granata F. et al. [6] publikoval bezrozměrný parametr I .

$$I = \left(\frac{2s}{g}\right)^{0.5} \cdot \frac{v_0}{D_M} \quad (3.14)$$

Kde je v_0 průřezová přítoková rychlost, s výška stupně ve spadišti a D_M průměr šachty. Bezrozměrný parametr I reprezentuje porovnání mezi vertikálním a horizontálním pohybem proudu. Když $I < 0.6$, paprsek dopadne na dno (typ RI-R1). Pokud $I > 1.0$, tak paprsek nejdříve dopadne na protilehlou stěnu (typ RI-R3). Jestliže je I v intervalu $(0.6; 1.0)$ paprsek dopadne přímo do odtoku (typ RI-R2).

Preferované řešení tlumení mechanické energie v šachtě závisí na velikosti mechanické energie na přítoku. Ideální hodnoty bezrozměrného parametru I jsou v intervalu $(1.0; 1.5)$. Aby bylo možno těchto hodnot dosáhnout je potřeba upravit tvar přelivné hrany tak, aby změnou došlo ke stočení paprsku dolů a nastával typ proudění RI-R3a.

2.7 Odtokové potrubí

Součástí odtokové potrubí někdy bývá i uklidňovací komora. Ta slouží k odvodu zdušeného proudu, ale u spadiště s nízkým spádem není zapotřebí ji osazovat. Odtokové potrubí musí mít dostatečně velký průměr, aby nedocházelo u provzdušněného a zvlněného proudu k vyplnění celého prostoru průřezu. Při zahlcení celého profilu může vznikat na odtoku tlakové proudění. Rozdělení průtoku při beztlakovém proudění popisuje Obrázek 2.6 v Kapitole 2.3 a Rovnice 2.3. Kde h_d je hloubka rovnoměrného proudění v odtokové stoce a D_{out} její průměr.

$$y_d = \frac{h_d}{D_{out}} \quad (2.3)$$

Při správné hydraulické funkci spadiště nebude docházet ke změně režimu proudění v odtokovém potrubí. Možností, jak eliminovat nepříznivé proudění RI-R2 viz. Obrázek 2.10, je vybudování odtokového potrubí v pravém úhlu, který bude svírat s přítokem. Při této dispozici nebude docházet k dopadu přepadajícího paprsku přímo do odtoku bez disipace energie. Experimentálně bylo ověřeno, že změnou směru odtoku nedocházelo k ovlivnění úrovně hladiny ve spadištvé šachtě [19].

Porovnáním výsledků publikovaných výzkumů Granaty F. [6] a Christodoulou G. [14], které se zabývaly otázkou, zda výška hladiny ve spadišti je ovlivněna sklonem odtokového potrubí, lze konstatovat, že tuto závislost není možno jednoznačně určit [19].

Při bystřinném proudění na odtoku je podle definice, rozruch odnášen dále ve směru proudění, a tak nemůže docházet ke zpětnému ovlivnění hladiny ve spadišti. Naopak, bude-li v odtokovém potrubí říční režim proudění, může docházet ve spadišti k ovlivnění výšky hladiny.

Chování na vtoku do odtokového potrubí začne být ovlivňováno při vzdutí hladiny nad jeho horní úroveň a při stálém stoupání hladiny v šachtě. Toto chování lze hydraulicky popsat jako výtok otvorem nebo vtok do propustku. Vzdutím hladiny v šachtě dojde k zahlcení odtokového potrubí a při bystřinném proudění na odtoku nebude docházet ke zpětnému zatápní potrubí a ovlivňování vlastností vtoku do odtokového potrubí.

HYDRAULICKÝ NÁVRH A POSOUZENÍ

Tato kapitola je zaměřena na jednotlivé části spadiště popsané v Kapitole 2.1.1. Popisované kapitoly jsou rozšířeny o vzorce a metodické postupy. Tuto část práce lze brát jako návod, ve kterém bude systematicky popsáno, jak kanalizační spadiště malého spádu navrhnout a posoudit.

3.1 Přítokové potrubí

Vztahy pro posouzení režimu proudění v přítokovém kruhovém potrubí podle Hagera W. [9].

Vypočtení bezrozměrného čísla rovnoměrného plnění q_N , pro které je potřeba znát Manningův součinitel drsnost n , průtok Q , sklon přítokového potrubí i_{in} a jeho průměr D_{in} .

$$q_N = \frac{n \cdot Q}{i_{in}^{1/2} \cdot D_{in}^{8/3}} \quad (3.1)$$

Získání poměrného plnění přítokového potrubí y_0 .

$$y_0 = 0.926 \cdot [1 - (1 - 3.11q_N)^{1/2}]^{1/2} \quad (3.2)$$

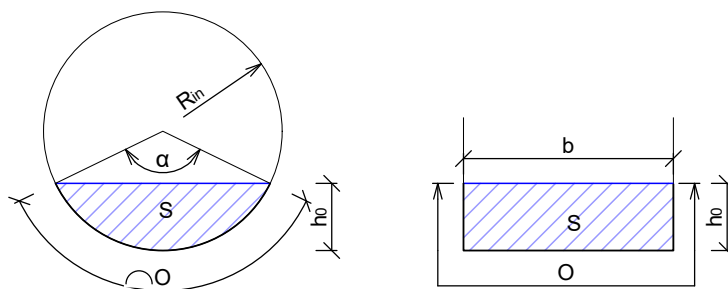
$$y_0 = \frac{h_0}{D_{in}} \quad (3.3)$$

Vypočtení kritické hloubky h_k z průtoku Q , průměru přítokového potrubí D_{in} a tíhového zrychlení g .

$$h_k = \sqrt{\frac{Q}{\sqrt{g \cdot D_{in}}}} \quad (3.4)$$

Stanovení Froudova čísla kruhového potrubí Fr , tento výraz Hager W. [9] odvodil z Froudova čísla otevřeného kanálu. K výpočtu jsou potřeba hodnoty průtoku Q , poloměr D_{in} , hloubka rovnoměrného proudění h_0 a tíhové zrychlení g .

$$Fr = \frac{Q}{\sqrt{g \cdot D_{in} \cdot h_0^4}} \quad (3.5)$$



Obrázek 3.1: Profily přítoku - kruhová úseč a přítokový kanál

Přítokové kruhové potrubí lze také posoudit přes geometrii kružnice - *kruhová úseč*, viz. Obrázek 3.1. Kde α - úhel kruhové úseče, R_{in} - poloměr přítokového potrubí, O - omočený obvod a S - plocha.

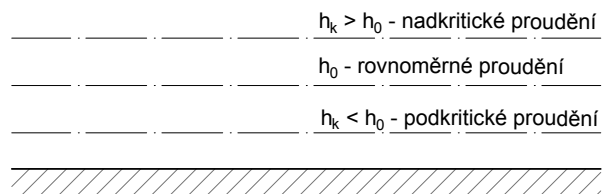
$$\alpha = 2 \cdot \arccos\left(\frac{R_{in} - h_0}{R_{in}}\right) \quad O = \frac{\Pi}{180} \cdot R_{in} \cdot \alpha \quad S = \frac{1}{2} R_{in} \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \Pi}{180} - \sin\alpha\right) \quad (3.6)$$

Při hranatém přítokovém kanále se využije poznatků hydrauliky otevřených koryt, viz. Obrázek 3.1 [4]. Posouzení vychází z veličin R - hydraulický poloměr, C - Chézyho rychlostní součinitel, v - průřezová rychlost proudění, Q - průtok a Fr - Froudovo číslo.

$$S = h_0 \cdot b \quad O = 2h_0 \cdot b \quad (3.7)$$

$$R = \frac{S}{O} \quad C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6} \quad v = C \cdot \sqrt{R \cdot i_{in}} \quad Q = v \cdot S \quad Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot S/b}} \quad (3.8)$$

Aplikace těchto vztahů probíhá opakovaně pro celé rozmezí průtoků. Z těchto vztahů také plyne hloubka při kritickém proudění h_k , hloubka při rovnoměrném proudění h_0 a režim proudění z Froudova čísla $Fr < 1$ - říční (podkritické) nebo $Fr > 1$ - bystrinné (nadkritické), viz. Obrázek 3.2.



Obrázek 3.2: Porovnání hladiny rovnoměrného proudění s kritickou hloubkou h_k

D_{in}	[m]	průměr přítokového potrubí
Fr	[-]	Froudovo číslo
h_0	[m]	hloubka v přítokovém potrubí
h_k	[m]	kritická hloubka
i_{in}	[-]	sklon přítokového potrubí
n	[-]	Manningův drsnostní součinitel
O	[m]	omočený obvod
Q	[m ³ /s]	průtok
q_N	[-]	rovnoměrné plnění
R	[m]	hydraulický poloměr
S	[m ²]	plocha
v	[m/s]	průřezová rychlost proudění
γ_0	[-]	poměrné plnění stoky při rovnoměrném proudění

3.2 Nátok na spadiště

Trajektorie obálek přepadajícího paprsku popisuje Hager W. [9] geometrickými parametry X, Z, T . Parametry X, Z definují body spodní obálky a T tloušťka paprsku. Uvedené vztahy platí pro Froudovo číslo $0.8 < Fr < 8.0$ a poměr plnění $y_0 < 0.9$. Pro nižší Froudovo číslo $Fr < 0.8$ nastává při říčním proudění na přelivné hraně kritická hloubka h_k .

$$X = \frac{x}{h_0} \cdot Fr^{-0.8} \quad Z = \frac{1}{3}X + \frac{1}{4}X^2 \quad (3.9)$$

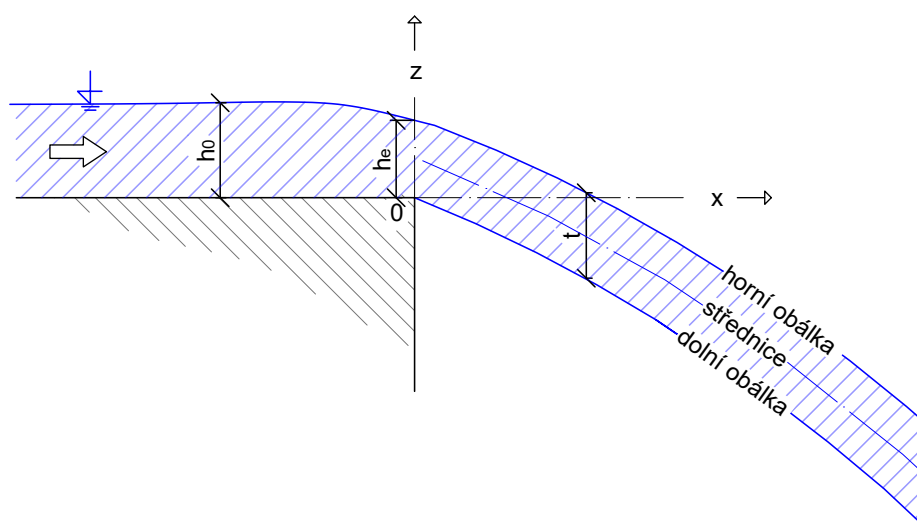
$$Z = \frac{z}{h_0} \quad (3.10)$$

$$T = 1 + 0.06X \quad (3.11)$$

$$T = \frac{t}{h_e} \quad (3.12)$$

Stanovit relativní odtokovou hloubku Y_e je důležité pro získání hloubky na přelivné hraně přepadu h_e potřebné pro výpočet tloušťky paprsku.

$$Y_e = \left(\frac{2Fr^2}{1 + 3Fr^2} \right)^{2/3} = \frac{h_e}{h_0} \quad (3.13)$$



Obrázek 3.3: Přepadový paprsek, upraveno [9]

Fr	[-]	Froudovo číslo
h_0	[m]	hloubka v přítokovém potrubí
h_e	[m]	hloubka na přelivné hraně přepadu
t	[m]	tloušťka paprsku ve svislém směru
x	[m]	vodorovná souřadnice bodu (x)
z	[m]	souřadnice bodu ve svislém směru (y)
Y_e	[-]	relativní odtoková hloubka

3.3 Spadišřová řachta

Bezrozměrný parametr I podle Granata F. [6] určuje místo dopadu paprsku. Kde je s - výřka stupně ve spadiřti, g - tíhové zrychlení, v_0 - průřezová rychlost v přítokové stoce a D_M - průměr spadiřřové řachty.

$$I = \left(\frac{2s}{g} \right)^{0.5} \cdot \frac{v_0}{D_M} \quad (3.14)$$

typ RI-R1	$I < 0.6$
typ RI-R2	$I = \langle 0.6; 1.0 \rangle$
typ RI-R3a	$I = \langle 1.0; 1.5 \rangle$
typ RI-R3b	$I > 1.5$

Pro stanovení hloubky nade dnem řachty byl z výřkumu určen vztah. Tento vztah platí pro typy proudění s volnou hladinou RI [7], viz. Obrázek 2.10. Při těchto režimech závisí hloubka vody v řachtě na vlastnostech přítoku a geometrii spadiřřě. Hloubku h_p získáme ze vztahu 3.15, kde je D_{out} - průměr odtokového potrubí, s - výřka stupně, D_M - průměr spadiřřové řachty, Q^* - Froudovo číslo spadiřřě a y_0 - poměr plnění v přítokovém potrubí.

$$\frac{h_p}{D_{out}} = 0.3 + \left(1 + \frac{s}{D_M} \right) \cdot \frac{Q^{*2}}{y_0^{1.4}} \quad (3.15)$$

Froudovo číslo spadiřřě je stanoveno výrazem:

$$Q^* = \frac{Q}{(g \cdot D_{out}^5)^{0.5}} \quad (3.16)$$

Pro typ proudění RI-R3 je vztah podobný výtoku otvorem. Výřka hladiny h_p závisí na průměru odtokového potrubí D_{out} , průměru spadiřřové řachty D_M a Froudově čísle spadiřřě Q^* .

$$\frac{h_p}{D_{out}} = 0.6 + \left(7.3 - \frac{D_M}{D_{out}} \right) \cdot Q^{*2} \quad (3.17)$$

K určení kapacitního průřoku vertikální řachty Q_M slouží Rovnice 3.18.

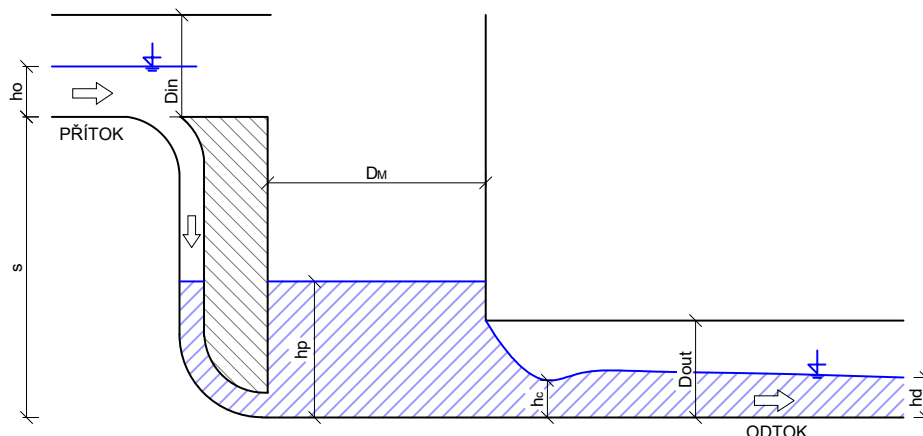
$$Q_M = \sqrt{g \cdot (D_M/1.25)^5} \quad (3.18)$$

Pro posouzení míry vzduřtí v řachtě se zachováním beztlakových podmínek odtoku slouží rovnice odvozená z Bernoulliho rovnice a teorie propustků. K nalezení hloubky v řachtě h_p při byřřinném proudění v odtokovém potrubí se využije Rovnice 3.19, viz. Obrázek 3.4. Kde je $i_{out} \cdot L \cong 0$, v_p - rychlost proudění v řachtě, h_c - zúžená hloubka, ξ - souřinitel zřřaty vtokem, v_c - průřezová rychlost proudění při zúženě hloubce [24].

$$i_{out} \cdot L + h_p + \frac{\alpha \cdot v_p^2}{2g} = h_c + (1 + \xi) \cdot \frac{\alpha \cdot v_c^2}{2g} = h_c + \frac{Q^2}{2g \cdot \varphi^2 \cdot S_c^2} \quad (3.19)$$

Výpočet zúžené hloubky h_c pro kruhové odtokové potrubí D_{out} a výřka hranatého odtokového kanálu H_{out} při zahlceném vtoku a nezatopeném odtoku ukazuje Rovnice 3.20.

$$h_c = 0.6 \cdot D_{out} \quad h_c = 0.62 \cdot H_{out} \quad (3.20)$$



Obrázek 3.4: Zahlčený nezatopený odtok

Rovnice rychlosti proudění v_p ve vertikální šachtě . Kde je S_M průřezová plocha šachty.

$$v_p = Q/S_M \quad (3.21)$$

Splněná podmínka zahlčení 3.22 říká, že pokud je výška hladiny v šachtě h_p větší než β násobek průměru odtokového potrubí D_{out} , tak došlo k zahlčení vtoku do odtokového potrubí.

$$h_p > \beta \cdot D_{out} \quad (3.22)$$

Obrázek 3.4 ilustruje vzduťou hladinu a průtok odtokovým potrubím. Tento průtok je kapacitním průtokem přítokového nebo odtokového potrubí a nezpůsobuje tlakové proudění na stokové síti.

Nalezení průtoku, který nezpůsobí zahlčení odtokového potrubí vychází z Rovnice 3.17 a 3.16. Ty se upraví pro výpočet průtoku Q respektive Q_{no} z rovnice pro Q^* .

β	[-]	součinitel zahlčení vtoku
D_M	[m]	průměr spadišřové šachty
D_{out}	[m]	průměr odtokového potrubí
g	[m/s ²]	třhové zrychlení
h_c	[m]	zúžená hloubka
h_p	[m]	hloubka vody ve spadišti
H_{out}	[m]	výška hranatého odtokového kanálu
I	[-]	bezrozměrný parametr
$i_{out} \cdot L$	[m]	vertikální navýšení
φ	[-]	součinitel rychlosti
Q	[m ³ /s]	průtok
Q^*	[-]	Froudovo číslo spadišřě
Q_{no}	[m ³ /s]	průtok nezahlčeného odtoku
Q_M	[m ³ /s]	kapacitní průtok vertikální šachtou
s	[m]	výška stupně ve spadišti
S_c	[m ²]	průřezová plocha proudy při zúžené hloubce
v_0	[m/s]	průřezová rychlost v přítokové stoce
v_c	[m/s]	průřezová rychlost proudění při zúžené hloubce
v_p	[m/s]	rychlost proudění v šachtě
ξ	[-]	součinitel ztráty vtokem
y_0	[-]	poměr plnění v přítokové stoce

3.4 Tlumení mechanické energie

Dostatečné utlumení kinetické energie proudu je základní funkcí spadišť. Tlumení energie probíhá zanořováním paprsku do objemu vody na dně objektu (typ R I -R1) nebo rozbitím paprsku o protilehlou stěnu rozstříkem (typ R I -R3). Nejméně příznivé pro tlumení energie je proudění typu R I -R2, kdy vodní paprsek dopadá přímo do odtokového potrubí a dochází k minimálnímu utlumení energie. Za těchto okolností může docházet k nežádoucím dějům podle Granata F. et al.[6].

Relativní účinnost tlumení energie vody η v objektu vychází z Obrázku 3.5 a Rovnice 3.23:

$$\eta = \frac{E_0 - H_d}{E_0} \quad (3.23)$$

E_0 [m] celková mechanická energie proudu vůči srovnávací rovině v přítokovém potrubí

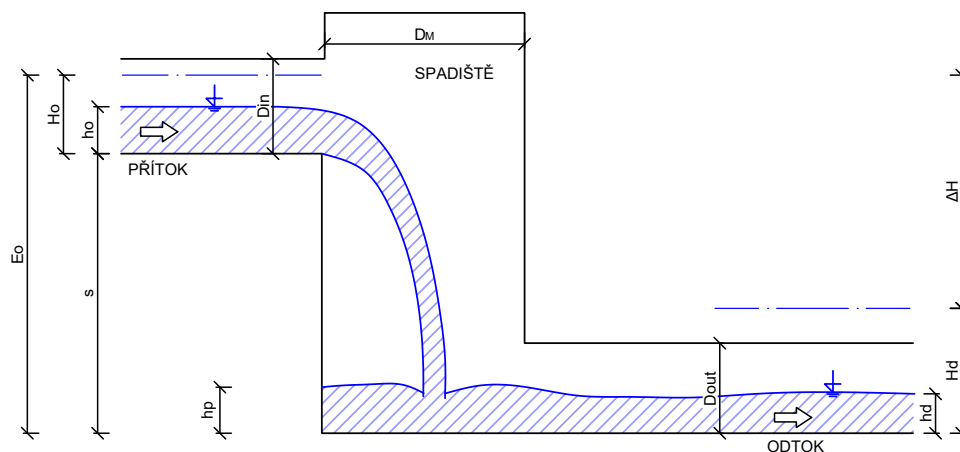
H_d [m] energetická výška průřezu v odtokovém potrubí

$$E_0 = s + h_0 + \frac{\alpha v_0^2}{2g} \quad (3.24)$$

$$H_0 = h_0 + \frac{\alpha v_0^2}{2g} \quad (3.25)$$

$$H_d = h_d + \frac{\alpha v_d^2}{2g} \quad (3.26)$$

α	[-]	součinitel kinetické energie
E_0	[m]	celková mechanická energie proudu vůči srovnávací rovině v přítokovém potrubí
g	[m/s ²]	tíhové zrychlení
h_0	[m]	hloubka v přítokovém potrubí
H_0	[m]	energetická výška průřezu v přítokovém potrubí
h_d	[m]	hloubka v odtokovém potrubí
H_d	[m]	energetická výška průřezu v odtokovém potrubí
v_0	[m/s]	průřezová rychlost v přítokovém potrubí
v_d	[m/s]	průřezová rychlost v odtokovém potrubí
s	[m]	výška stupně



Obrázek 3.5: Spadiště s přímým nátokem

3.5 Odtokové potrubí

S odtokovým potrubím souvisí i míra provzdušnění proudu vody na odtoku, která závisí na geometrii objektu. Množství vzduchu v odtokovém proudu stoupá s průtokem při typech proudění RI-R1 a RI-R2. Při typu proudění RI-R3 dochází k redukci množství vzduchu proudícího odtokovým potrubím. To způsobuje vzduť hladiny v šachtě. Zahlčení odtoku u spadiště je jevem, který nastává při poměru výšky stupně s a průměru odtokového potrubí D_{out} dle Rovnice 3.27

$$\frac{s}{D_{out}} > 2 \quad (3.27)$$

Pokud dojde k zahlčení odtoku, tak výška hladiny h_p začne stoupat. Když hladina ve spadišti stoupne na úroveň výšky stupně $h_p = s$, začne docházet ke zpětnému ovlivňování vlastností přítoku vlivem vzduť vody ve spadiškové šachtě.

Granata F. et al. [6] publikoval kombinační parametr ψ popisující zahlčení odtoku, který je ovlivněn vlastnostmi proudu na přítoku.

Pro získání parametru začátku zahlčení ψ_{ch} je zapotřebí zná poměr plnění přítokového potrubí y_0 . Rovnice 3.28 tvoří rozhraní zahlčeného nebo nezahlčeného odtoku pro plnicí poměr potrubí ($0.30 \leq y_0 \leq 0.75$).

$$\psi_{ch} = -5.9 \cdot y_0 + 3.5 \quad (3.28)$$

K získání parametru ψ je zapotřebí zná průtok Q , hloubku rovnoměrného proudění v přítokovém potrubí h_0 , jeho průměr D_{in} , poměr částečného plnění přítokového potrubí y_0 , hloubku vody ve spadišti h_p , průměr odtokového potrubí D_{out} a tíhové zrychlení g .

$$\psi = y_0 \left[\frac{Q}{\sqrt{g \cdot D_{in} \cdot h_0^4}} - \frac{h_p}{D_{out}} \right] \quad (3.29)$$

Porovnáním hodnoty ψ s počátkem zahlčení ψ_{ch} je možné ověřit riziko zahlčení potrubí za objektem spadiště. Pokud bude $\psi > \psi_{ch}$ k zahlčení odtoku nedojde.

D_{in}	[m]	průměr přítokového potrubí
D_{out}	[m]	průměr odtokového potrubí
g	[m/s ²]	tíhové zrychlení
h_0	[m]	hloubka v přítokovém potrubí
h_p	[m]	hloubka vody ve spadišti
ψ_{ch}	[-]	součinitel počátku zahlčení přítokové stoky
ψ	[-]	součinitel zahlčení
Q	[m ³ /s]	průtok
s	[m]	výška stupně
y_0	[-]	poměr plnění v přítokové stoce

PŘÍPADOVÉ STUDIE

V této kapitole budou posouzeny a ověřeny spadiště, která byla projektována podle Městských standardů pro území hlavního města Prahy.

V záhlaví tabulek jsou uvedena čísla použitých rovnic. Vzorce byly uvedeny v předchozích kapitolách.

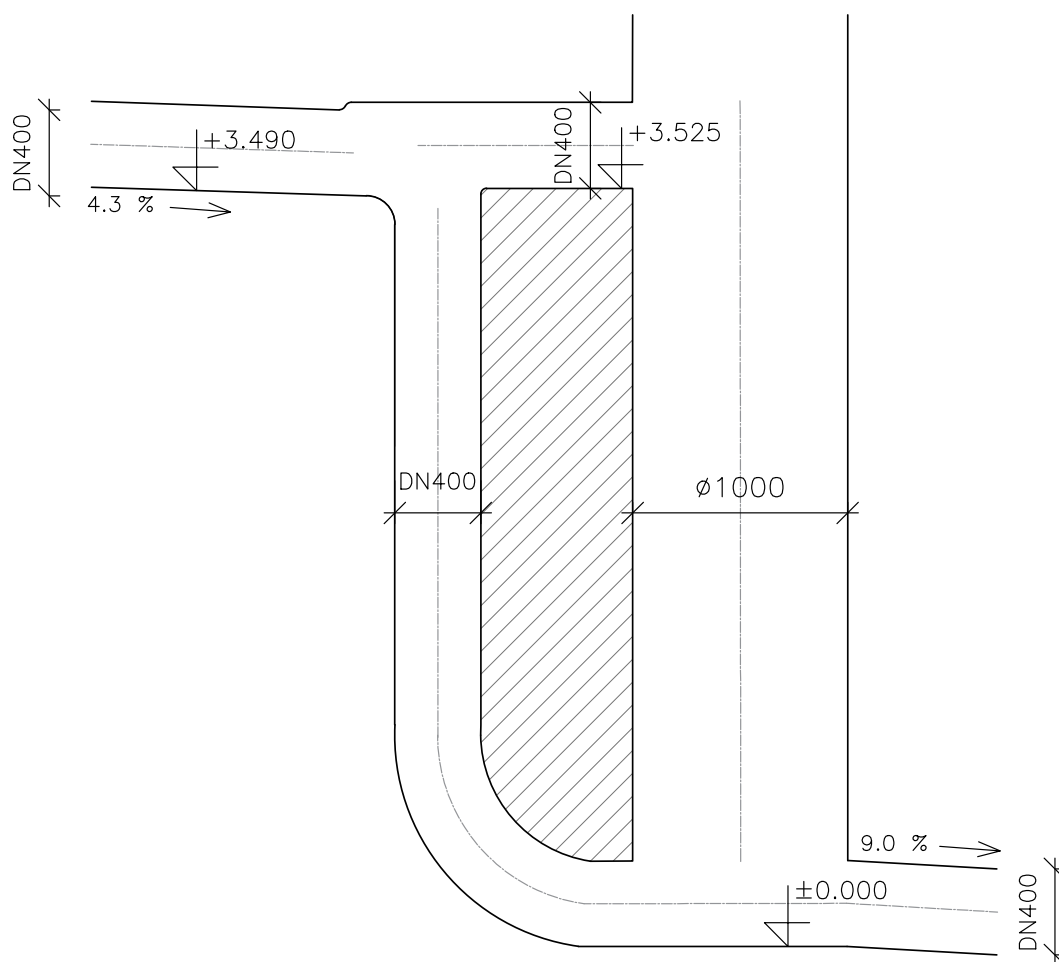
4.1 Kruhové spadiště Karlín s obtokovým potrubím

Karlínské spadiště je typizované prefabrikované spadiště s obtokovým potrubím mimo spadiškový prostor. Je navrženo podle Městských standardů hl.m. Prahy [26]. Spadiště se nachází v Praze Karlíně pro areálovou kanalizaci TGB a je zaústěno do kmenového přivaděče B, který vede do shybky pod Vltavou.

Vstupní podklady pro posouzení:

- Přítokové potrubí: průměr DN 400, sklon 4.3 %, kamenina, kapacitní průtok 460 l/s
- Parametry šachty: kruhová šachta $D_M = 1.0$ m, výška stupně $s = 3.49$ m
- Odtokové potrubí: průměr DN 400, sklon 9.0 %, kamenina, kapacitní průtok 670 l/s

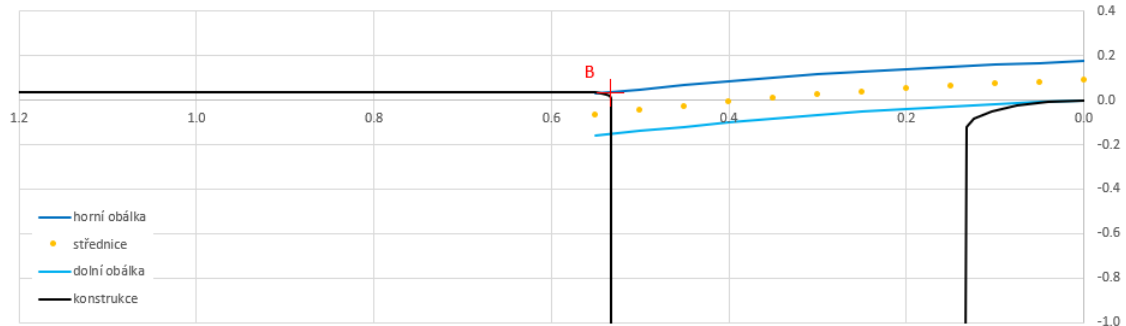
Cíle: Nalezení mezního průtoku Q_{mez} , při kterém začne docházet k rozstříku o hranu rozstříku. Stanovení kapacitního beztlakového průtoku Q_{bkap} .



Obrázek 4.1: Spadiště Karlín

4.1.1 Mezní průtok Q_{mez}

Za mezní průtok lze považovat takový průtok, který se začne rozstříkovat o bod rozstříku B (0.53, 0.035). Tento průtok byl stanoven analýzou trajektorie horní obálky paprsku a následným porovnáním souřadnic obálky s bodem rozstříku B . Mezní průtok byl stanoven podle Obrázku 4.2 na hodnotu $Q_{mez} = 205$ l/s.



Obrázek 4.2: Paprsek při průtoku Q_{mez}

Tabulka 4.1: Částečné plnění přítokového potrubí podle Hagera [9]

	(3.1)	(3.2)	(3.3)
Q [l/s]	Q [m ³ /s]	qn [-]	y_0 [-]
205	0.205	0.137	0.455

Tabulka 4.2: Částečné plnění přítokového potrubí přes geometrii kružnice, viz. Obrázek 3.2

h_0 [m]	y_0 [-]	α [°]	O [m]	S [m ²]	n	R [m]	C	v [m/s]	Q [m ³ /s]
0.182	0.455	169.70	0.592	0.0557	0.012	0.094	56.19	3.57	0.199

Tabulky 4.1 a 4.2 zobrazují poměrné plnění a hloubku rovnoměrného proudění v přítokovém potrubí. Při mezním průtoku $Q_{mez} = 205$ l/s je hloubka rovnoměrného proudění $h_0 = 0.18$ m a poměrné plnění $y_0 = 0.455$.

Bod rozstříku B je horizontálně zvýšen oproti přelivné hraně obtokového potrubí o 35 mm. Proud při této konfiguraci konstrukce a průtoku naráží kolmo na stěnu obtokového potrubí a dochází k rozstříku.

Tabulka 4.3: Posouzení spadiškové šachty Q_{mez}

Q [m ³ /s]	S [m ²]	v_0 [m/s]	h_0 [m]	y_0 [-]	h_k [m]	Fr_0	y_d [-]	v_d [m/s]	Fr_d
0.205	0.056	3.683	0.182	0.455	0.322	3.123	0.37	4.672	4.729

Podle Tabulky 4.3 nastává na přítoku a odtoku bystrinné proudění, což potvrzuje Froudovo číslo $Fr > 1$. Nicméně paprsek při této velikosti průtoku naráží na hranu obtokového potrubí, kde se rozstříkává v bodě B a dále odtéká obtokovým potrubím.

Tabulka 4.4: Posouzení odtoku a účinnosti tlumení

	(3.5)		(3.25)	(3.26)	(3.23)
Q [m ³ /s]	Fr_d	v_d [m/s]	H_0 [m]	H_d [m]	η
0.205	4.729	4.672	0.873	1.485	0.66

Tabulka 4.4 popisuje vlastnosti odtoku, kde nastává vysoce bystrinné proudění. Ke vzduť při mezním průtoku Q_{mez} nedochází a celý rovnou odtéka odtokovým potrubím. Nebude docházet ke zpětnému zatápní potrubí, protože bystrinné proudění s vysokým Froudovým číslem $Fr_d = 4.7$ toto neumožní. Míra tlumení energie $\eta = 66\%$ je nedostatečná [9].

4.1.2 Beztlakový kapacitní průtok Q_{bkap}

Beztlakový kapacitní průtok Q_{bkap} je takový průtok, který nezpůsobí v přítokovém ani odtokovém potrubí tlakový režim proudění. Výpočet vychází z předpokladu zahlceného vtoku do odtokového potrubí.

Vertikální kapacita šachty Q_M , viz. Rovnice 3.18.

$$Q_M = \sqrt{9.81 \cdot (1/1.25)^5} = 1.79 \text{ m}^3/\text{s}$$

Vertikální kapacity šachty $Q_M = 1.79 \text{ m}^3/\text{s}$ nemůže být dosažena za předpokladu beztlakového proudění na stokové síti, protože limitující velikostí průtoku je kapacitní průtok přítokovým potrubím $Q = 0.46 \text{ m}^3/\text{s}$. Kapacitní průtok odtokového potrubím je $Q = 0.67 \text{ m}^3/\text{s}$.

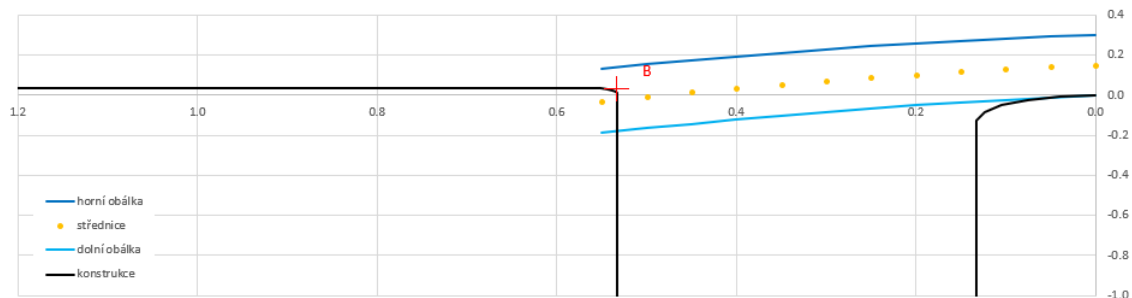
Tabulka 4.5: Vertikální šachta

	(3.2)	(3.3)		(3.21)	(3.21)
Q [m^3/s]	y_0 [-]	h_0 [m]	D_M [m]	S_M [m^2]	v_p [m/s]
0.460	0.820	0.328	1.0	0.785	0.586

Tabulka 4.6: Zatopení šachty při Q_{bkap}

	(3.2)	(3.3)	(3.20)				(3.19)
Q [m^3/s]	y_d [-]	h_d [m]	h_c [m]	S_c [m^2]	v_c [m/s]	φ	h_p [m]
0.460	0.597	0.239	0.240	0.079	5.843	0.85	2.631

Výpočet vzdutí při beztlakovém kapacitním průtoku Q_{bkap} je v Tabulce 4.5 a 4.6, grafické znázornění viz. Obrázek 3.4. Hloubka $h_p = 2.631 \text{ m}$ je při průtoku $Q_{bkap} = 460 \text{ l/s}$, kdy tento průtok je kapacitním průtokem přítokového potrubí. Poměr částečného plnění odtokového potrubí $y_d = 0.6$ je při hloubce rovnoměrného proudění $h_d = 0.24 \text{ m}$.



Obrázek 4.3: Paprsek při beztlakovém kapacitním průtoku Q_{bkap}

Paprsek beztlakového kapacitního průtoku Q_{bkap} naráží do hrany obtokového potrubí a dochází k rozstříku o bod rozstříku B . Průtok větší než Q_{bkap} způsobí vznik tlakového proudění v přítokovém potrubí. Na tlakové proudění není stoková síť dimenzována, a proto může způsobovat problémy. Při průtoku Q_{bkap} je vzdutí hladiny v šachtě menší než výška stupně, $h_p < s$. Tento průtok nezpůsobí zatopení přítokového potrubí a ovlivňování jeho vlastností. Podmínka zahlceného vtoku dle Rovnice 3.22 je splněna.

4.1.3 Shrnutí

Tabulka 4.7 prezentuje škálu průtoků použitých pro posouzení. Popisuje vlastnosti přítokového a odtokového potrubí a vzdutí ve spadiškové šachtě. Režim proudění v přítokovém potrubí bude bystřinný pro všechny průtoky, to stejné platí pro odtokové potrubí.

Tabulka 4.7: Posouzení spadiškové šachty

	(3.3)	(3.2)	(3.5)	(3.2)		(3.5)	(3.19)	
Q [m ³ /s]	v_0 [m/s]	h_0 [m]	y_0 [-]	Fr_0	y_d [-]	v_d [m/s]	Fr_d	h_p [m]
0.205	3.572	0.182	0.46	3.12	0.370	4.672	4.73	-
0.320	3.992	0.240	0.60	2.81	0.476	5.271	4.46	1.397
0.425	4.219	0.300	0.75	2.39	0.567	5.661	4.18	2.281
0.460	4.244	0.328	0.82	2.16	0.597	5.767	4.07	2.631

Froudovo číslo $Fr_d > 1$ a režim proudění je pro odtokové potrubí stálý a pro celé rozmezí průtoků zůstává na odtoku bystřinné proudění. Změna bystřinného proudění na říční dále za objektem může způsobit vznik vodního skoku.

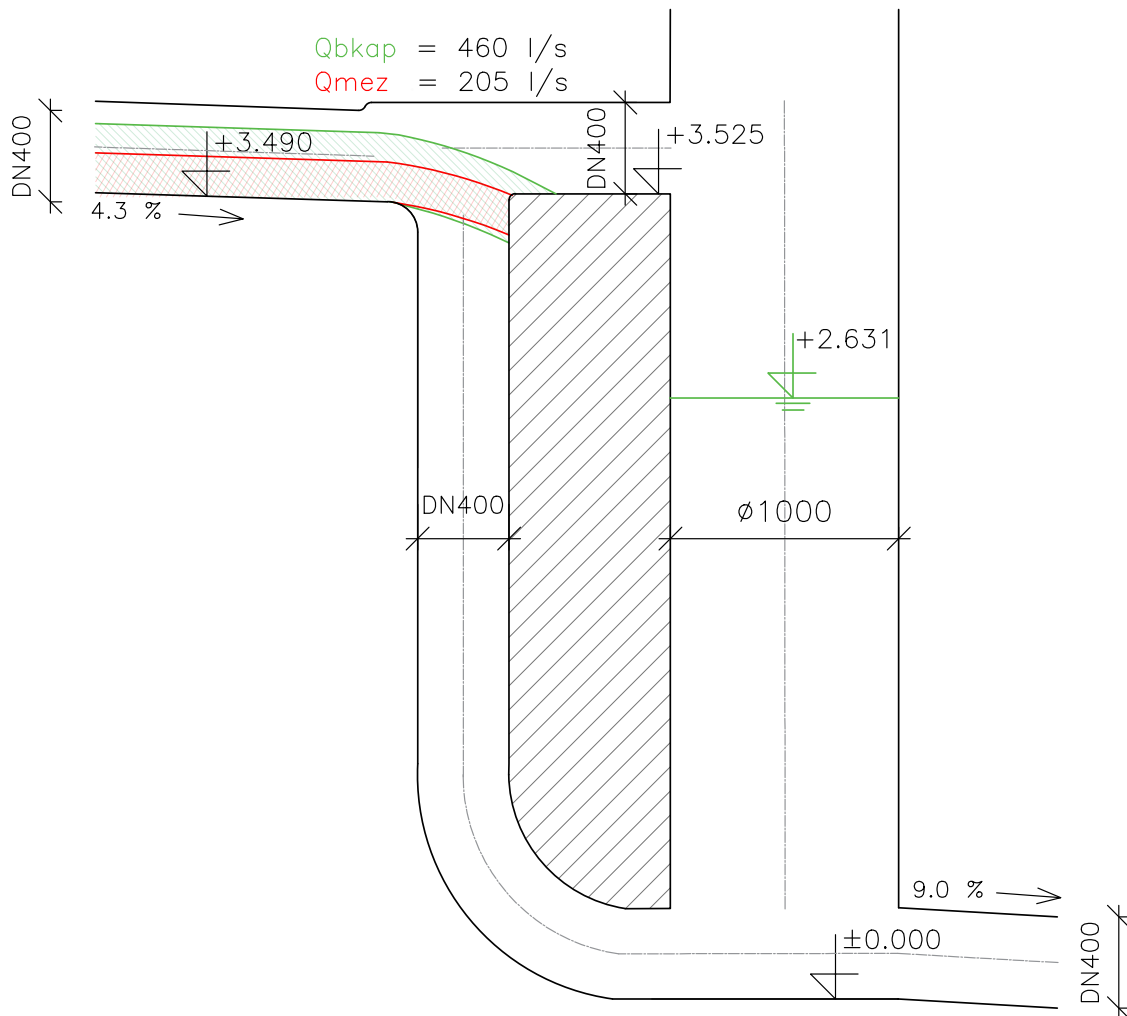
Účinnosti tlumení energie η zobrazuje Tabulka 4.8, utlumení energie při Q_{bkap} je $\eta = 58\%$, disipace energie je menší než 80% a proto je nedostatečná [9].

Tabulka 4.8: Účinnosti tlumení energie

	(3.25)	(3.19)	(3.3)	(3.26)	(3.23)	
Q [m ³ /s]	H_0 [m]	h_p [m]	h_d [m]	H_d	η	
Q_{mez}	0.205	0.873	0.741	0.148	1.485	0.66
	0.320	1.083	1.461	0.190	1.799	0.61
	0.425	1.203	2.281	0.227	1.978	0.58
Q_{bkap}	0.460	1.215	2.763	0.239	1.998	0.58

4.1.4 Závěr

Kruhové spadiště s obtokovým potrubím mimo spadišřový prostor navržené do Karlína podle Městských standardů hl.m. Prahy se ukázalo být z několika důvodů nevhodné. U průtoků ovlivněných srážkami, bude docházet k narážení paprsku do blízkosti bodu rozstřiku *B*. K rozstřiku začne docházet ještě před dosažením Q_{mez} a bude k němu docházet v celém rozmezí průtoků až po beztlakový kapacitní průtok Q_{bkap} . Proud se v žádné situaci nedostane celý nad bod rozstřiku *B* a proto nikdy nebude celý dopadat na protějščí stěnu. Dispozice s horizontálním navýšením rozstřikové hrany podle Městských standardů hl. m. Prahy [26] se ukazuje jako nevhodná.



Obrázek 4.4: Průtoky a průběh hladin spadiště Karlín

Doporučení

- Snížit hranu rozstřiku oproti přítokovému potrubí.
- Upravit tvar horní konstrukce clony podle trajektorie dolní obálky paprsku při průtoku Q_{bkap} .

4.2 Spadiště Rumunská s obtokovým potrubím

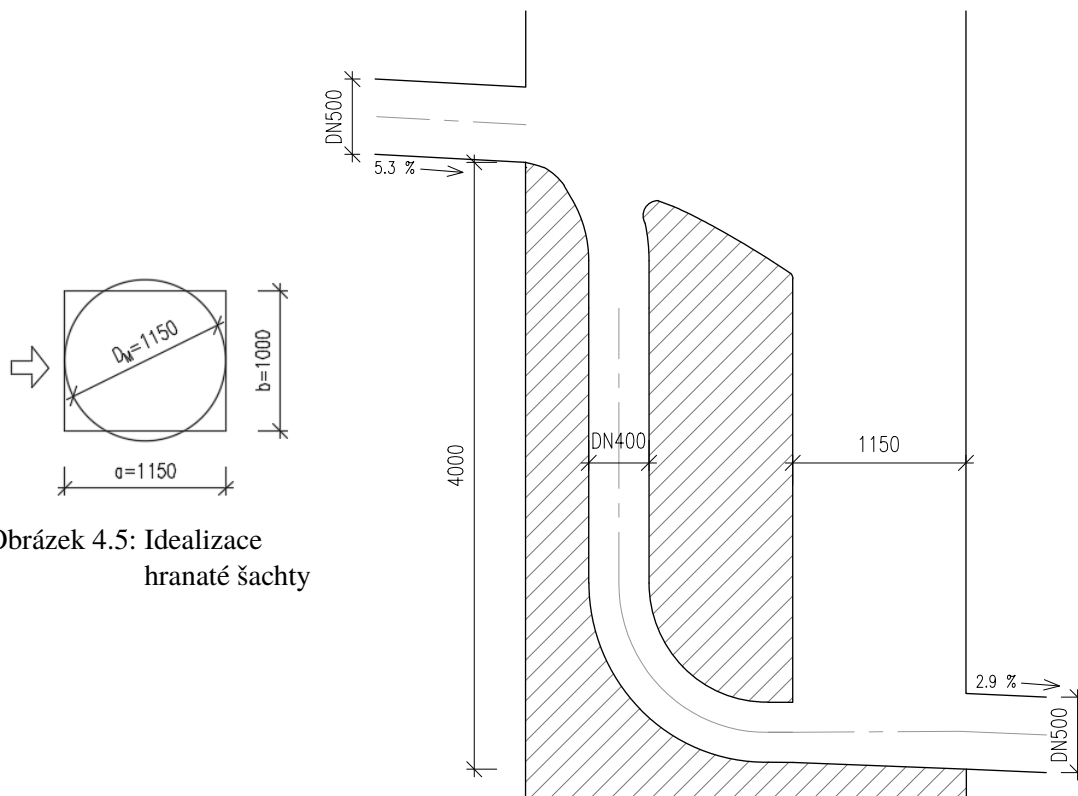
Pro připravovanou rekonstrukci jednotné kanalizace v ulici Rumunská na Praze 2, je navrženo podle Standardů hl. m. Prahy [26] spadiště s obtokovým potrubím. Spadiště by se mělo nacházet mezi ulicemi Rumunská a Bělehradská. Zkapacitnění stávající jednotné kanalizace DN 400 na DN 500 a změnou směrových poměrů dojde k lepšímu převedení významné srážkové události. Schéma spadiště Rumunská viz. Obrázek 4.6.

Vstupní podklady pro posouzení:

- Přítokové potrubí: průměr DN 500, sklon 5.3 %, kamenina, kapacitní průtok profilu 937 l/s
- Parametry šachty: obtokové potrubí DN 400, hranatá šachta 1.0 x 1.15 m, výška stupně $s = 4$ m
- Odtokové potrubí: průměr DN 500, sklon 2.9 %, kamenina, kapacitní průtok profilu 701 l/s
- Vstupní hydraulické parametry: průměrný bezdeštný průtok $Q_{pru} = 2.6$ l/s, maximální bezdeštný průtok $Q_{spl} = 3.2$ l/s, připojený počet ekvivalentních obyvatel 1400 EO

Cíle: Ověření bezdeštného průtoku Q_{spl} . Nalezení mezního průtoků Q_{mez} , průtoku nezahlceného odtoku Q_{no} a beztlakového kapacitního průtoku Q_{bkap} .

Vzorce pro výpočty ve spadištvé šachtě jsou primárně určeny pro kruhové šachty. Proto byla provedena hydraulická schematizace, kdy hranatá šachta byla nahrazena idealizovanou vepsanou kružnicí, viz. Obrázek 4.5. Kde: $a = 1.15$ m, $b = 1.0$ m $\rightarrow D_M = 1.15$ m.



Obrázek 4.5: Idealizace hranaté šachty

Obrázek 4.6: Spadiště Rumunská

4.2.1 Bezdeštný průtok Q_{spl}

Ověření, že se Q_{spl} vejde do obtokového potrubí.

Tabulka 4.9: Částečné plnění přítokového potrubí podle Hagera [9]

	(3.1)	(3.2)	(3.3)
Q [l/s]			
Q [m ³ /s]			
	qn [-]	y_0 [-]	h_0 [m]
3.2	0.0032	0.001	0.038
			0.019

Tabulka 4.10: Částečné plnění přítokového potrubí přes geometrii kružnice, viz. Obrázek 3.2

	(3.6)	(3.6)	(3.6)		(3.8)	(3.8)	(3.8)	(3.8)	
h_0 [m]	y_0 [-]	α [°]	O [m]	S [m ²]	n	R [m]	C	v [m/s]	Q [m ³ /s]
0.019	0.039	45.44	0.198	0.0025	0.012	0.013	40.25	1.04	0.003

Při $Q_{spl} = 3.2$ l/s je výška hladiny rovnoměrného proudění v přítokovém potrubí $h_0 = 0.02$ m při poměru plnění $y_0 = 0.04$.

Hodnoty částečného plnění se velmi podobají při použití obou metod. Přístup Hagera je velmi specifický viz. Tabulka 4.9, ale lze ho nahradit geometrickou metodou přes středový úhel α kruhové úseče viz. Tabulka 4.10.

Tabulka 4.11: Posouzení spadiškové šachty Q_{spl}

	(3.3)	(3.2)	(3.4)	(3.5)	(3.2)	(3.3)		(3.5)	
Q [m ³ /s]	v_0 [m/s]	h_0 [m]	y_0 [-]	h_k [m]	Fr_0	y_d [-]	h_d [m]	v_d [m/s]	Fr_d
0.003	1.332	0.019	0.038	0.038	4.089	0.044	0.022	0.835	3.024

Froudovo číslo přítoku Fr_0 v Tabulce 4.11 popisuje vysoce bystřinné proudění. To nastává pokud je Froudovo číslo větší než 1. Paprsek celý dopadá do obtokového potrubí a odtéká jím, takže nedochází ke vzdouvání hladiny v šachtě. Hladina rovnoměrného proudění odtokovým potrubím $h_d = 0.022$ m je při poměru plnění $y_d = 0.044$.

Vlastnosti odtoku a účinnost tlumení energie popisuje Tabulka 4.11 a 4.12. Režim proudění na odtoku je bystrinný ($Fr_d > 1$) a kritická hloubka h_k se nachází nad hladinou rovnoměrného proudění h_0 . Nastává velké tlumení energie η o 98.6 % oproti přítoku.

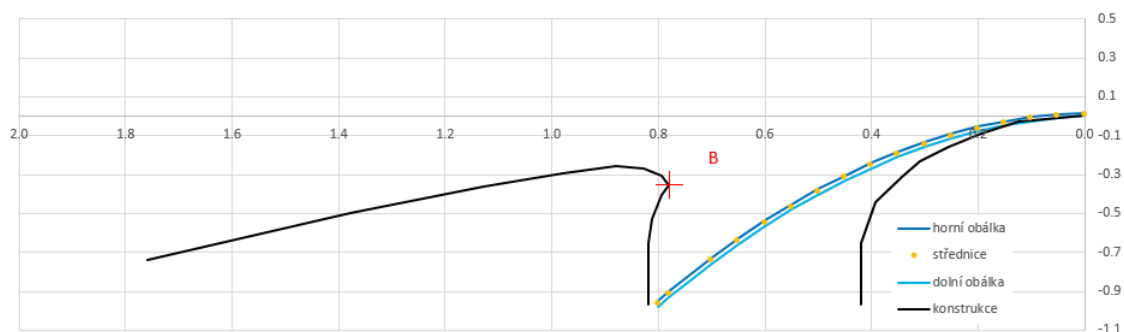
Tabulka 4.12: Posouzení odtoku a účinnosti tlumení

	(3.25)	(3.3)	(3.26)	(3.23)
Q [m ³ /s]	H_0 [m]	h_d [m]	H_d	η
0.003	0.109	0.02	0.057	0.986

Trajektorie paprsku podle vzorců Hagera, viz. Kapitola 3.2.

Tabulka 4.13: Trajektorie paprsku při Q_{spl}

x	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	...	0.75	0.78	0.85
zd	0	-0.009	-0.025	-0.049	-0.079	-0.117		-0.893	-0.962	-1.134
t	0.018	0.019	0.020	0.021	0.022	0.023		0.032	0.033	0.034
zh	0.018	0.010	-0.005	-0.028	-0.058	-0.095		-0.860	-0.929	-1.100



Obrázek 4.7: Paprsek při průtoku Q_{spl}

Tabulka 4.13 a Obrázek 4.7 ověřují, že pro maximální bezdeštný průtok Q_{spl} je obtokové potrubí navrženo správně a tento průtok se do potrubí celý "schová". Tento průtok bude efektivně a bezpečně převeden a utlumen a nebude docházet ke vzdouvání hladiny v šachtě.

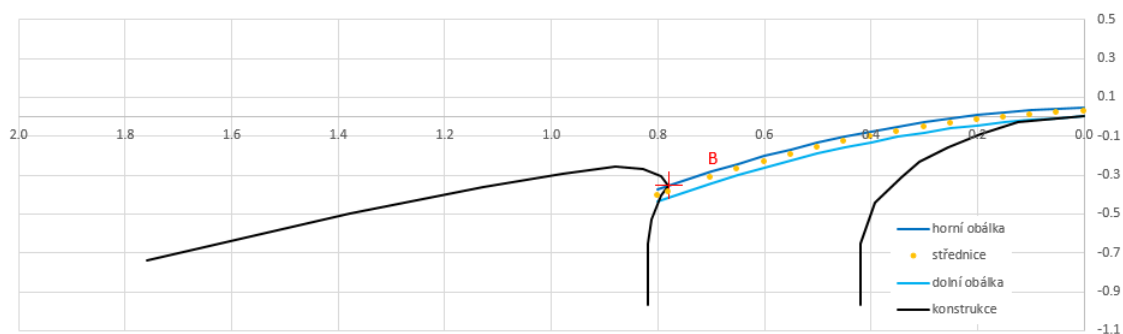
4.2.2 Mezní průtok Q_{mez}

Pomocí analýzy horní obálky paprsku byl nalezen mezní průtok Q_{mez} , takový při kterém začne docházet k rozstříku paprsku o hranu obtokového potrubí. Tento jev je nežádoucí, protože při něm vzniká aerosol.

Tabulka 4.14: Trajektorie paprsku při Q_{mez} , viz. Kapitola 3.2

x	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	...	0.75	0.78	0.85
zd	0.000	-0.007	-0.016	-0.029	-0.044	-0.061		-0.390	-0.418	-0.488
t	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052		0.062	0.062	0.064
zh	0.047	0.041	0.033	0.022	0.008	-0.009		-0.328	-0.356	-0.425

Porovnáním souřadnic trajektorií horních obálek paprsků s bodem rozstříku B (0.78, -0.35) se určil mezní průtok, při kterém se začne horní obálka dotýkat bodu B a začne docházet k rozstříku. Mezní průtok byl vyhodnocen jako $Q_{mez} = 21$ l/s.



Obrázek 4.8: Paprsek při průtoku Q_{mez}

Tabulka 4.15: Částečné plnění přítokového potrubí pro Q_{mez} , podle Hagera [9]

Q [l/s]	Q [m ³ /s]	qn [-]	y_0 [-]	h_0 [m]
21	0.021	0.007	0.097	0.048

Poměrné plnění přítokového potrubí při průtoku Q_{mez} je $y_0 = 0.1$ s hloubkou $h_0 = 0.048$ m.

Tabulka 4.16: Posouzení spadištvé šachty pro Q_{mez}

Q [m ³ /s]	S_0 [m ²]	v_0 [m/s]	h_0 [m]	y_0 [-]	h_k [m]	Fr_0	y_d [-]	h_d [m]	v_d [m/s]
0.021	0.0097	2.164	0.048	0.10	0.097	4.070	0.112	0.056	1.532

Kritická hloubka h_k na přítoku je vyšší než hloubka h_0 , proudění bude vysoce bystrinné, což dokládá i Froudovo číslo přítoku Fr_0 . Paprsek mezního průtoku Q_{mez} bude narážet do hrany obtokového potrubí a odtékat jím. Míra tlumení energie η bude dostatečná, viz. Tabulka 4.21.

4.2.3 Průtok nezahlceného odtoku Q_{no}

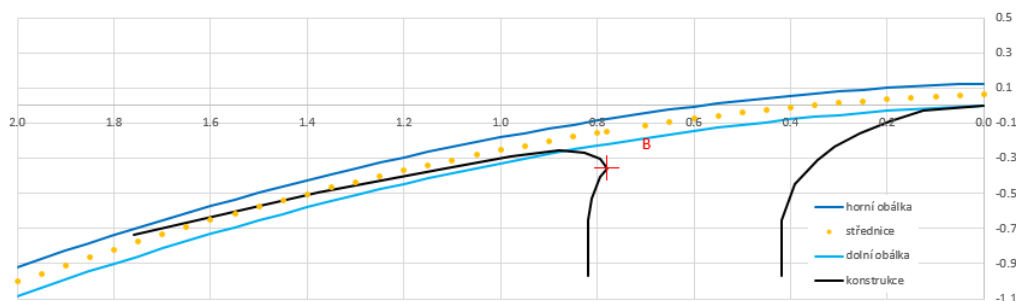
Průtok nezahlceného odtoku odpovídá takovému průtoku, při kterém je horní hrana odtokového potrubí nad hladinou vody v šachtě. Neboli poměr hloubky v šachtě a průměru odtokového potrubí je roven 95 % ($h_p/D_{out} = 0.95$).

Tabulka 4.17: průtok nezahlceného odtoku Q_{no}
(3.17) (3.17) (3.16)

D_{out} [m]	h_p/D_{out}	h_p [m]	Q^*	Q [m ³ /s]
0.5	0.95	0.475	0.26457	0.146

Hloubky v šachtě $h_p = 0.475$ m bude dosaženo při průtoku $Q_{no} = 0.146$ m³/s.

Při průtoku nezahlceného odtoku $Q_{no} = 0.146$ m³/s bude docházet k částečnému odrazu průtok o hranu za hranou obtokového potrubí, viz. Obrázek 4.9. Obtokovým potrubím nic nepoteče.



Obrázek 4.9: Paprsek při průtoku Q_{no}

Tabulka 4.18: Parametry přítokového potrubí při Q_{no} podle Hagera [9]
(3.1) (3.2) (3.3)

Q [l/s]	Q [m ³ /s]	qn [-]	y_0 [-]	h_0 [m]
146	0.146	0.048	0.259	0.129

Tabulka 4.18 ukazuje parametry na přítoku při průtoku nezahlceného odtoku Q_{no} . Při tomto průtoku bude hloubka rovnoměrného proudění v přítokovém potrubí $h_0 = 0.129$ m a poměr částečného plnění $y_0 = 0.26$.

4.2.4 Beztlakový kapacitní průtok Q_{bkap}

Beztlakový kapacitní průtok Q_{bkap} je takový průtok, který nezpůsobí v přítokovém ani odtokovém potrubí tlakový režim proudění. Výpočet vychází z předpokladu zahlceného nezatopeného vtoku do odtokového potrubí.

Vertikální kapacita šachty Q_M , viz. Rovnice 3.18.

$$Q_M = \sqrt{9.81 \cdot (1.15/1.25)^5} = 2.54 \text{ m}^3/\text{s}$$

Vertikální kapacity šachty $Q_M = 2.54 \text{ m}^3/\text{s}$ nemůže být dosažena za předpokladu beztlakového proudění na stokové síti, protože limitující velikostí průtoku objektem je kapacitní průtok odtokového potrubí $Q = 0.701 \text{ m}^3/\text{s}$. Kapacitní průtok přítokového potrubí je $Q = 0.937 \text{ m}^3/\text{s}$.

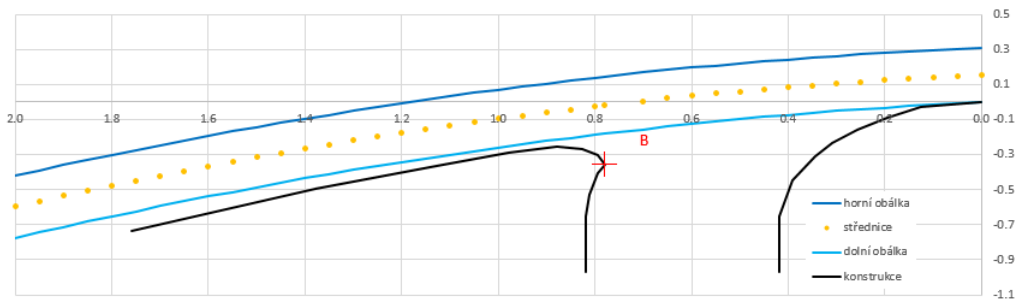
Tabulka 4.19: Vertikální šachta

	(3.2)	(3.3)		(3.21)	(3.21)
Q [m^3/s]	y_0 [-]	h_0 [m]	D_M [m]	S_M [m^2]	v_p [m/s]
0.701	0.636	0.318	1.15	1.038	0.675

Tabulka 4.20: Zatopení šachty při Q_{bkap}

	(3.2)	(3.3)	(3.20)				(3.19)
Q [m^3/s]	y_d [-]	h_d [m]	h_c [m]	S_c [m^2]	v_c [m/s]	φ	h_p [m]
0.701	0.850	0.425	0.300	0.123	5.699	0.85	2.614

Výpočet vzduť při beztlakovém kapacitním průtoku Q_{bkap} je v Tabulce 4.19 a 4.20, viz. schéma na Obrázku 3.4. Hloubka $h_p = 2.614 \text{ m}$ je při průtoku $Q_{bkap} = 701 \text{ l/s}$, tento průtok je kapacitním průtokem odtokového potrubí. Poměr částečného plnění odtokového potrubí $y_d = 0.85$ nastane při hloubce rovnoměrného proudění $h_d = 0.425 \text{ m}$. Parametry přítoku pro průtok Q_{bkap} jsou hloubka v potrubí $h_0 = 0.32 \text{ m}$ a poměr plnění $y_0 = 0.64$.



Obrázek 4.10: Paprsek při beztlakovém kapacitním průtoku Q_{bkap}

Paprsek beztlakového kapacitního průtoku Q_{bkap} teče celý nad hranou odtokového potrubí a dopadá na protější stěnu spadiště. Proudění ve spadišti odpovídá typu proudění R II, viz. Obrázek 2.9. Průtok větší než Q_{bkap} způsobí vznik tlakové proudění v odtokovém potrubí. Na tlakové proudění není stoková síť dimenzována, a proto může způsobovat problémy. Při průtoku Q_{bkap} je vzduť hladiny v šachtě menší než výška stupně, $h_p < s$. Tento průtok nezpůsobí zatopení přítokového potrubí a neovlivní jeho vlastnosti. Podmínka zahlceného vtoku dle Rovnice 3.22 je splněna.

4.2.5 Shrnutí

Tabulka 4.21 porovnává vliv velikosti průtoku na přítoku s účinností tlumení energie η . Míra utlumení energie je skoro pro všechny průtoky dostatečná, $\eta > 80\%$ [9].

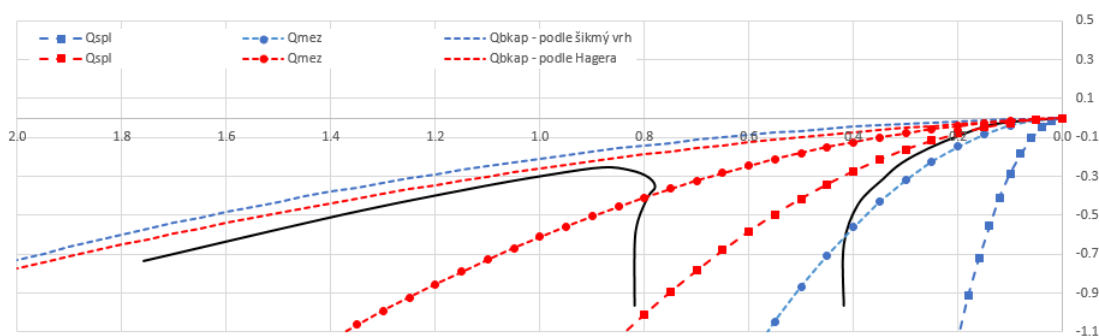
Tabulka 4.21: Účinnosti tlumení energie

	(3.25)	(3.19)	(3.3)	(3.26)	(3.23)	
	Q [m ³ /s]	H_0 [m]	h_p [m]	h_d [m]	H_d	
Q_{spl}	0.003	0.109	-	0.022	0.057	0.99
Q_{mez}	0.021	0.287	-	0.056	0.176	0.96
Q_{no}	0.146	0.797	0.475	0.152	0.543	0.89
	0.480	1.482	1.385	0.301	1.041	0.81
Q_{bkap}	0.701	1.759	2.614	0.425	1.255	0.78

Obrázek 4.11 zobrazuje porovnání dvou metod pro určení trajektorie paprsku. Trajektorie dolních obálek paprsků v modré barvě je určena principem šikmého vrhu, viz. Rovnice 2.2. Trajektorie dolních obálek paprsků v červené barvě jsou stanoveny podle Hagerových vzorců, viz. Rovnice 3.9. V obou případech jsou uvažovány shodné průtoky - $Q_{spl} = 3.2$ l/s, $Q_{mez} = 21$ l/s a $Q_{bkap} = 701$ l/s.

Nesoulad v trajektoriích, lze přisoudit jinému primárnímu určení vzorců šikmého vrhu. V případové studii spadiště Rumunská je velký sklon přívodního potrubí, takže voda získá na rychlosti a energii. Hager své vzorce sestavil přímo pro použití na stokové síti a proto v nich zohledňuje režim proudění na přítoku Fr_0 . To zohlední fakt, že i malé průtoky s malou rychlostí v_0 při bystřinném proudění disponují na vtoku velkou energií a trajektorie paprsku se tomuto stavu přizpůsobí.

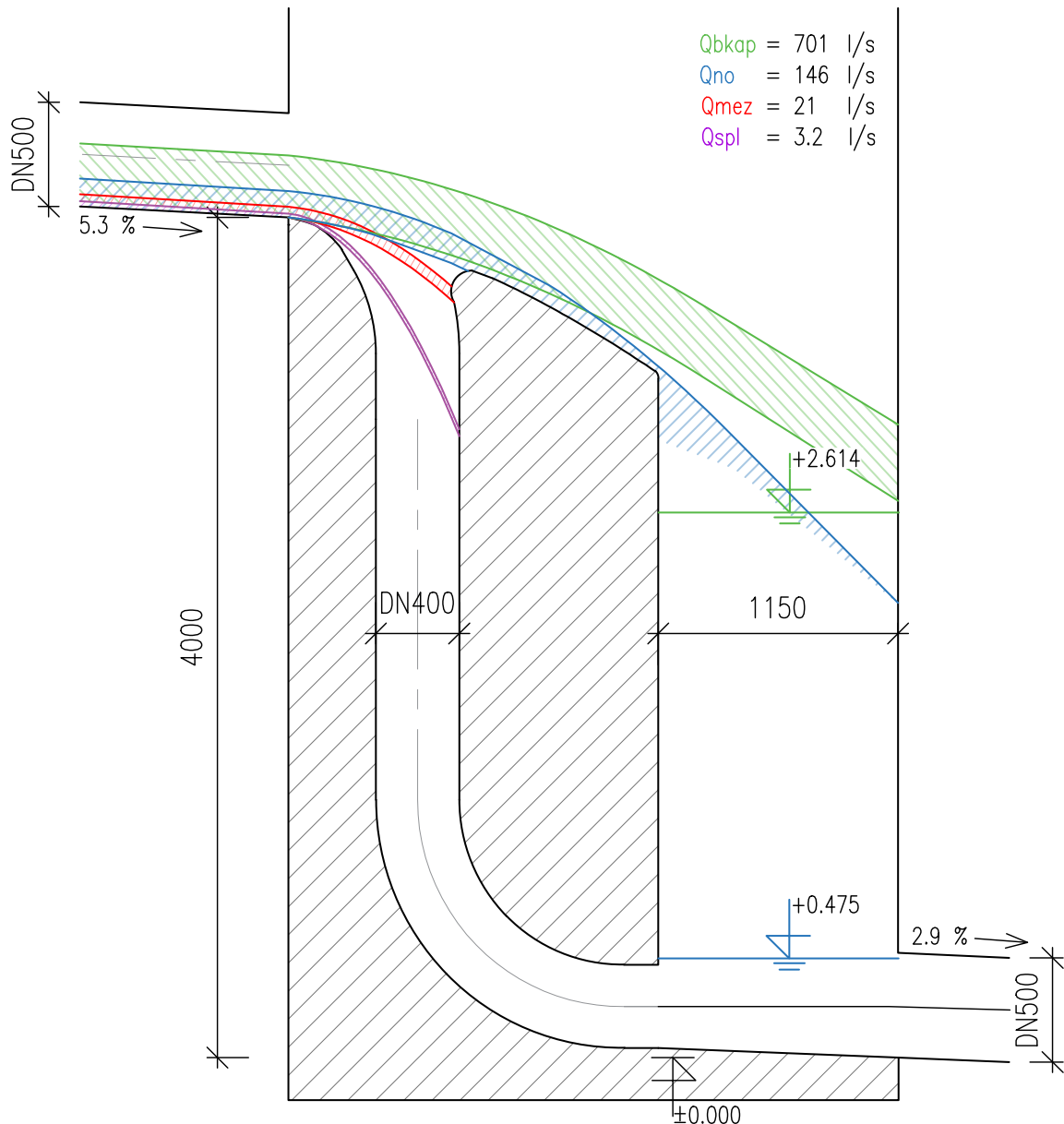
Naopak vzorce šikmého vrhu uvažují jen úhel δ , který svírá vektor rychlosti v_0 s vodorovnou osou x . Zanedbání mechanické energie způsobí, že malé průtoky mají krátkou dráhu letu. V případě spadiště Rumunská by byly přimknuty k vnitřní straně obtokového potrubí. Podobné trajektorie ve srovnání s Hagerem se získávají až od velkých průtoků, např. při Q_{bkap} jsou takřka shodné.



Obrázek 4.11: Porovnání trajektorie dolních obálek paprsků

4.2.6 Závěr

Rekonstrukce jednotné kanalizace v ulici Rumunská, na které je projektované i spadiště, je kapacitně navrhována na blokový déšť. Tento déšť vytvoří menší průtok, než je průtok beztlakový kapacitní. Jelikož se jedná o spadiště, které je navrženo na pražské stokové síti, tak musí splňovat požadavky Městských standardů hl. m. Prahy. Bylo ověřeno, že maximální bezdeštný (splaškový) průtok Q_{spl} bude převeden obtokovým potrubím dle požadavků Standardů. Byl nalezen mezní průtok Q_{mez} , při kterém začne docházet k nežádoucímu rozstříku paprsku o bod rozstříku B . Při průtoku nezahlceného odtoku Q_{no} bude vzduť v šachtě h_p menší než průměr odtokového potrubí D_{out} . Beztlakový kapacitní průtok Q_{bkap} může být dosažen až při vydatné srážkové události, která by musela dle skutečných geografických poměrů zasáhnou relativně malé povodí s vysokou intenzitou a významnou délkou trvání.



Obrázek 4.12: Průtoky a průběh hladin spadiště Rumunská

4.3 Spadiště Miranova bez obtokového potrubí

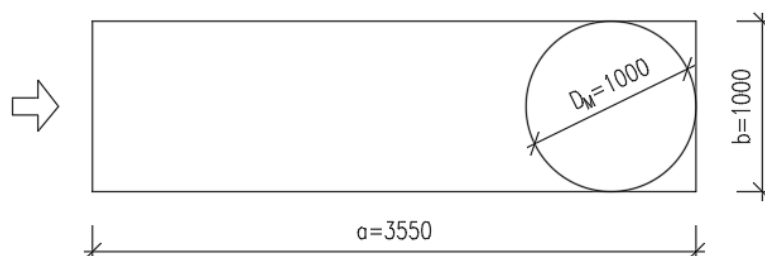
Kanalizační spadiště se nachází v ulici Miranova v Praze Hostivaři. Hlavní funkcí tohoto spadiště bylo zmírnit celkový sklon jednotné kanalizace a umožnit pokračování stoky v menším spádu.

Vstupní data pro posouzení:

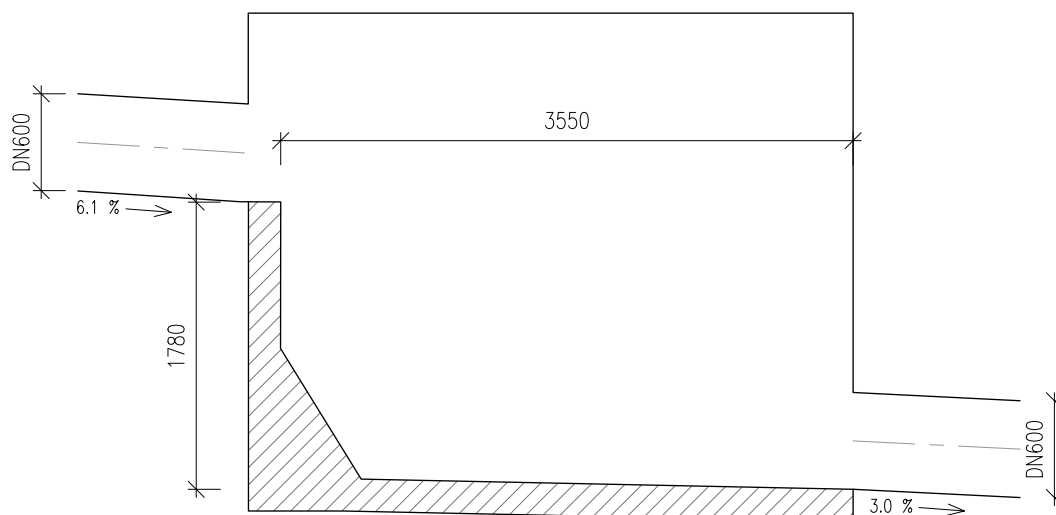
- Přítokové potrubí: průměr DN 600, sklon 6.1 %, kamenina, kapacitní průtok 1.5 m³/s
- Parametry šachty: hranatá šachta 3.55 x 1.0 m, výška stupně $s = 1.78$ m
- Odtokové potrubí: průměr DN 600, sklon 3.0 %, kamenina, kapacitní průtok 1.097 m³/s

Cíle: Nalezení beztlakového kapacitního průtoku Q_{bkap} a analýza dalších průtoků

Protože se jedná o hranatou šachtu, je zapotřebí si spadištvý prostor pro některé rovnice schematizovat, což bylo provedeno vepsáním kružnice. Rozměry prostoru jsou $a = 3.55$ m, $b = 1.0$ m $\rightarrow D_M = 1.0$ m. Nelze použít pro idealizaci rozměr a jako D_M , protože by docházelo k velkému zkreslení výsledků. Použití rozměru b pro průměr D_M je na straně bezpečnosti, viz. Obrázek 4.13.



Obrázek 4.13: Idealizace šachetního prostoru



Obrázek 4.14: Spadiště Miranova

4.3.1 Beztlakový kapacitní průtok Q_{bkap}

Pro nalezení beztlakového průtoku spadiště Q_{bkap} se použije menší z kapacitních průtoků přítokového nebo odtokového potrubí. Pro toto spadiště je limitující kapacitní průtok odtoku $Q = 1079$ l/s. Při větším průtoku by vznikalo tlakové proudění v navazující stokové síti. Kapacitní průtok přítokového potrubí je $Q = 1500$ l/s.

Tabulka 4.22: Částečné plnění přítokového potrubí Q_{bkap} , podle Hagera [9]

	(3.1)	(3.2)	(3.3)	
Q [l/s]	Q [m ³ /s]	qn [-]	y_0 [-]	h_0 [m]
770	0.770	0.158	0.496	0.298
1097	1.097	0.225	0.624	0.374

Tabulka 4.23: Částečné plnění přítokového potrubí přes geometrii kružnice, viz. Obrázek 3.2

	(3.6)	(3.6)	(3.6)	(3.8)	(3.8)	(3.8)	(3.8)	(3.8)	
h_0 [m]	y_0	α [°]	O [m]	S_0 [m ²]	n	R [m]	C	v [m/s]	Q [m ³ /s]
0.298	0.496	179.18	0.94	0.14	0.013	0.15	56.03	5.35	0.749
0.374	0.624	208.60	1.09	0.19	0.013	0.17	57.24	5.82	1.080

Parametry průtoku při porovnání obou metod z Tabulky 4.22 a Tabulky 4.23 se shodují.

Tabulka 4.24: Vertikální šachta

	(3.21)	(3.21)	
Q [m ³ /s]	a [-]	b [m]	v_p [m/s]
0.770	3.550	1.0	0.217
1.097	3.550	1.0	0.309

Tabulka 4.25: Zatopení šachty při Q_{bkap}

	(3.2)	(3.3)	(3.2)	(3.3)	(3.20)	(3.19)		
Q [m ³ /s]	y_0 [-]	h_0 [m]	y_d [-]	h_d [m]	h_c [m]	S_c [m ²]	φ	h_p [m]
0.770	0.496	0.298	0.624	0.374	0.360	4.085	0.850	1.691
1.097	0.624	0.374	0.921	0.553	0.360	4.192	0.850	3.061

Kapacitní průtok odtokového potrubí je 1097 l/s. Hloubka v šachtě při tomto průtoku je $h_p = 3.061$ m, nicméně výška stupně je pouze $s = 1.78$ m. Tento průtok nemůže spadištěm proudit, protože $h_p \gg s$. Beztlakový kapacitní průtok spadiště Q_{bkap} musí být menší než je kapacita odtokového potrubí. Průtok Q_{bkap} bude tak velký, aby splňoval podmínku $h_p \approx s$. Od této výšky vzduší začne docházet k zatápní průtoku a k ovlivňování jeho vlastností.

Byl tedy stanoven menší beztlakový kapacitní průtok $Q_{bkap} = 770$ l/s. Hloubka v přívodním potrubí při Q_{bkap} je $h_0 = 0.298$ m a poměrné plnění $y_0 = 0.496$. Míra vzduť ve špadištvé řachtě $h_p = 1.69$ m < výřka stupně s , viz. Tabulka 4.25.

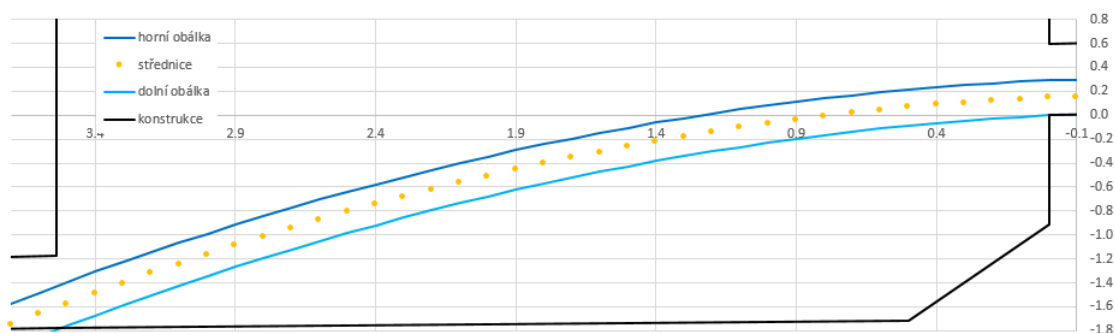
Tabulka 4.26: Posouzení přítoku a odtoku

Q [m ³ /s]	v_0 [m/s]	h_0 [m]	y_0 [-]	Fr_0	y_d [-]	v_d [m/s]	Fr_d	h_p [m]
0.770	5.497	0.298	0.496	3.578	0.624	4.085	2.265	1.691

Podle Tabulky 4.26 je proudění při průtoku Q_{bkap} na přítoku i odtoku byřtřinné. Protože Froudova čísla přítoku Fr_0 a odtoku Fr_d jsou větří než 1.

Tabulka 4.27: Posouzení spadiřtvé řachtě při Q_{bkap}

Q [m ³ /s]	h_0 [m]	v_0 [m/s]	I [-]	typ	H_0 [m]	h_d [m]	H_d [m]	η
0.770	0.298	5.497	3.31	RI-R3b	1.838	0.374	1.225	0.661



Obrázek 4.15: Trajektorie paprsku při Q_{bkap}

V Tabulce 4.27 bezrozměrný parametr I a typ proudění ve spadiřti RI-R3b neodpovídají trajektorii paprsku při beztlakovém kapacitním průtoku, protože dořlo vlivem schematizace průměru spadiřtvé řachtě D_M ke zkreslení hodnot. Typ proudění určený podle Obrázku 4.15 je RI-R2, bezrozměrný parametr I by odpovídal intervalu $\langle 0.6; 1.0 \rangle$. Proud bude dopadat přímo do odtokové potrubí a dále odtékat. Účinnost tlumení energie η vychází podle Tabulky 4.27 na 66 %. Toto utlumení ve skutečnosti nezle dosáhnou kvůli typu proudění RI-R2, reálná míra utlumení energie při tomto průtoku bude minimální.

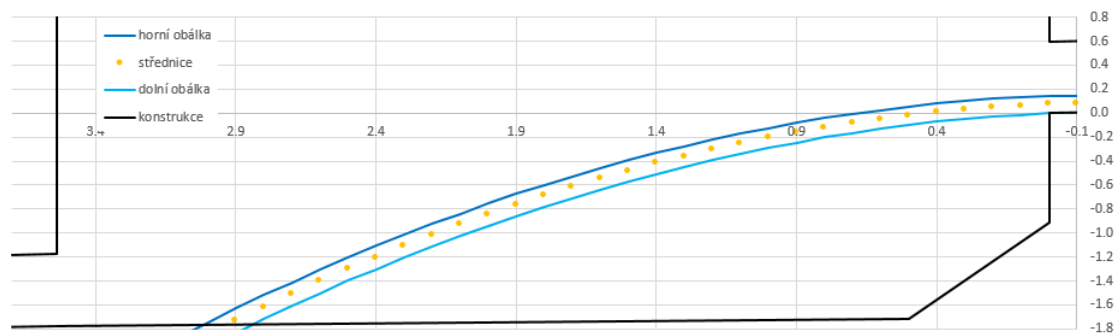
4.3.2 Průtok nezahlceného odtoku Q_{no}

K nalezení průtoku, který nezahltí odtok se využije Rovnic 3.17 a 3.16. Průtok Q_{no} bude takový, při kterém bude poměr vzduší hladiny v šachtě h_p/D_{out} roven 0.95.

Tabulka 4.28: Průtok nezahlceného odtoku Q_{no}

D_{out} [m]	h_p/D_{out}	h_p [m]	Q^*	Q [m ³ /s]
0.6	0.95	0.57	0.2493	0.218

Velikost průtok nezahlceného odtoku Q_{no} je 218 l/s, viz. Tabulka 4.28. Chování paprsku proudu ve spadišti ilustruje Obrázek 4.16, kde trajektorie paprsku dopadá na dno spadiště a následně dojde k odrazu do odtokového potrubí a do stěny nad něj, typ proudění RI-R2.



Obrázek 4.16: Paprsek při průtoku Q_{no}

Tabulka 4.29: Částečné plnění přítokového potrubí Q_{no} , podle Hagera [9]

Q [l/s]	Q [m ³ /s]	qn [-]	y_0 [-]	h_0 [m]	Fr_0
218	0.218	0.045	0.249	0.149	4.027

Tabulka 4.30: Posouzení spadišřové šachty při Q_{no}

Q [m ³ /s]	h_0 [m]	v_0 [m/s]	I [-]	typ	H_0 [m]	h_d [m]	H_d [m]	Fr_d	η
0.218	0.149	3.966	2.39	RI-R3b	0.951	0.180	0.614	2.777	0.775

Parametry přítoku pro průtok nezahlceného odtoku $Q_{no} = 218$ l/s jsou hloubka rovnoměrného proudění v přítokovém potrubí $h_0 = 0.15$ m s poměrem plnění $y_0 = 0.25$, viz. Tabulka 4.29.

V Tabulce 4.30 je bezrozměrný parametr I a typ proudění RI-R3b ovlivněn schematizací. Skutečný typ proudění určený podle Obrázku 4.16 je RI-R2, kdy paprsek bude dopadat před odtokové potrubí a odrážet se do něj. Bezrozměrný parametr I by odpovídal intervalu $\langle 0.6; 1.0 \rangle$.

4.3.3 Analýza rozkolísanosti průtoků

Analýza rozkolísanosti průtoků pro spadiště v ulici Miranova byla stanovena pro pět průtoků. Průtoky byly vybrány na základě poměru částečného plnění. Velikost průtoků zobrazuje Tabulka 4.31.

Tabulka 4.31: Analýza částečné plnění přítokového potrubí, podle Hagera [9]

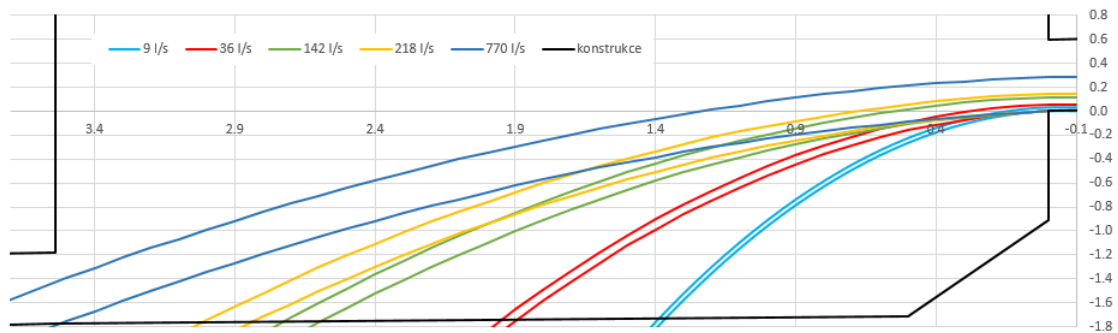
	(3.1)	(3.2)	(3.3)	
Q [l/s]	Q [m ³ /s]	qn [-]	y_0 [-]	h_0 [m]
9	0.009	0.002	0.050	0.030
36	0.036	0.007	0.100	0.060
142	0.142	0.029	0.200	0.120
218	0.218	0.045	0.249	0.149
770	0.770	0.158	0.496	0.298

Tabulka 4.32 popisuje hydraulické chování spadiště při zkoumaných průtocích. Ve všech případech je $h_0 < h_k$ a Froudovo číslo Fr_0 větší než 1, pro celé rozmezí průtoků budou zachovány shodné podmínky na přítoku. Bezrozměrný parametr I a typ proudění ve spadišti jsou ovlivněny idealizací $D_M = 1$ m, viz. Obrázek 4.18.

Tabulka 4.32: Analýza hydraulických parametrů spadiště

	(3.3)	(3.2)	(3.4)	(3.5)	(3.14)				
Q [m ³ /s]	S_0 [m ²]	v_0 [m/s]	h_0 [m]	y_0 [-]	h_k [m]	Fr_0	I [-]	typ	typ _{opr}
0.009	0.005	1.723	0.030	0.050	0.061	4.172	1.038	RI-R3a	RI-R1
0.036	0.015	2.460	0.060	0.100	0.122	4.154	1.482	RI-R3a	RI-R1
0.142	0.040	3.537	0.120	0.200	0.242	4.081	2.131	RI-R3b	RI-R2
0.218	0.055	3.966	0.149	0.249	0.300	4.027	2.389	RI-R3b	RI-R2
0.770	0.140	5.497	0.298	0.496	0.563	3.578	3.311	RI-R3b	RI-R2

Typy_{opr} proudění spadištěm v Tabulce 4.32 jsou určeny ručně podle charakteru dopadu paprsku ve spadišti, viz. Obrázek 4.17. Světle modrý paprsek reprezentuje průtok 9 l/s a dopadá na dno spadiště, čili nastává typ proudění RI-R1. Typ proudění RI-R1 nastává i pro průtok 36 l/s při poměrném plnění přítokového potrubí $y_0 = 0.1$. Od poměrného plnění $y_0 > 0.2$ bude paprsek dopadat na dno v koncové části spadiště a bude nastávat typ proudění RI-R2. Při tomto místě dopadu bude docházet k odrazu paprsku do odtokového potrubí a k nízkému utlumení mechanické energie η , viz. Tabulka 4.33. Pokud paprsek dopadá do odtokového potrubí nebo do jeho blízkosti, tak se jedná o typ RI-R2. Průtok $Q = 142$ l/s při poměrném plnění $y_0 = 0.2$ je možné označit za průtok mezní Q_{mez} , protože je hraničním průtokem mezi typy proudění ve spadišti RI-R1 a RI-R2.

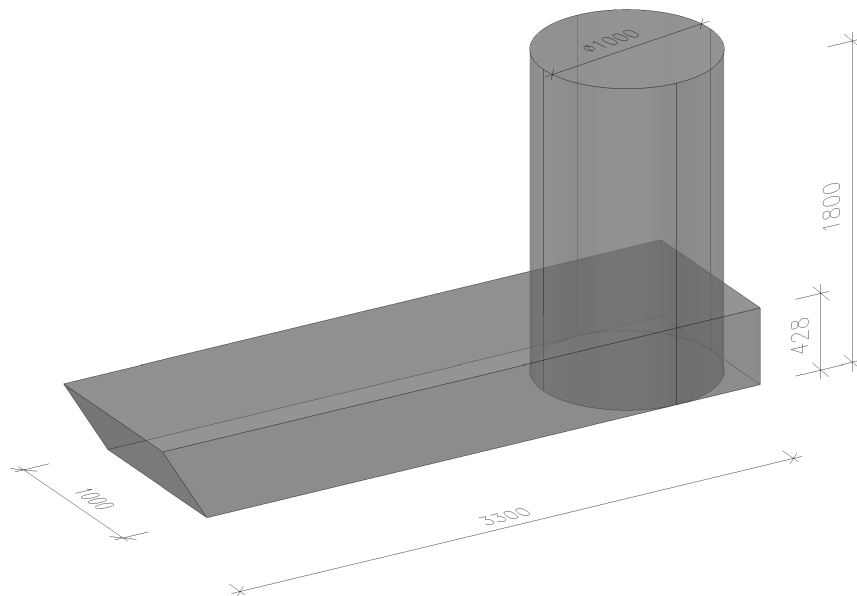


Obrázek 4.17: Trajektorie paprsků

Tabulka 4.33: Účinnosti tlumení energie

	(3.2)	(3.3)	(3.25)	(3.19)	(3.3)		(3.26)	(3.23)
Q [m ³ /s]	y_0 [-]	h_0 [m]	H_0 [m]	h_p [m]	h_d [m]	v_d [m/s]	H_d	η
0.009	0.050	0.030	0.181	-	0.036	1.084	0.096	0.951
0.036	0.100	0.060	0.368	-	0.071	1.685	0.216	0.899
Q_{mez}	0.142	0.200	0.120	0.758	-	0.144	0.481	0.810
Q_{no}	0.218	0.249	0.149	0.951	0.570	0.180	0.614	0.775
Q_{bkap}	0.770	0.496	0.298	1.838	1.691	0.374	1.225	0.661

Účinnost tlumení energie η pro průtoky s poměrným plněním $y_0 < 0.2$ je na úrovni dostatečné míry tlumení (> 80 %) [9]. Tlumení energie u dalších průtoků kvůli typu proudění R I -R2 je zanedbatelné vlivem dopadu paprsku do odtokového potrubí.

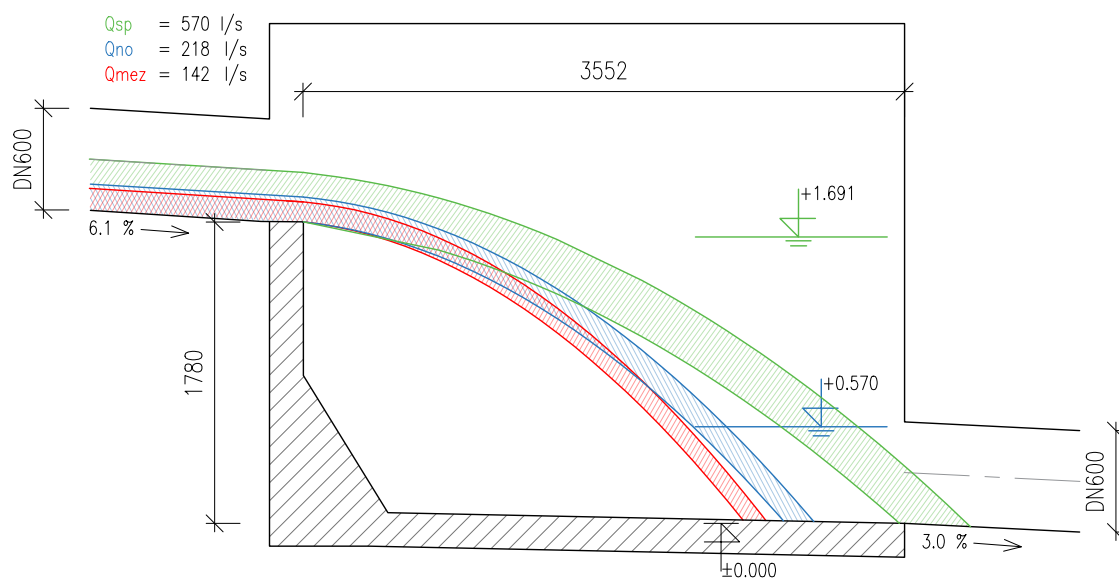


Obrázek 4.18: Schéma idealizace

4.3.4 Závěr

Stanovený beztlakový kapacitní průtok $Q_{bkap} = 770$ l/s je průtokem bezpečným, při kterém nebude docházet k zatápní přítoku a k ovlivňování jeho vlastností. Analýza rozkolísanosti průtoků ukázala, že při nízkých průtocích a typu proudění ve spadišti RI-R1 bude tlumení energie η dostatečné. Úroveň tlumení energie η větších průtoků, u kterých bude část paprsku dopadat přímo do odtokového potrubí, je tlumení zanedbatelné. To odpovídá charakteru proudění ve spadišti při typu RI-R2.

Spadiště v ulici Miranova je navrženo nevhodně. Dopadem paprsku do odtokového potrubí dojde k přímému odtoku proudů s vysokou energií do stokové sítě. Výsledek tohoto posouzení je ale ovlivněn schematizací a pro přesnější popsání chování tohoto spadiště by bylo zapotřebí udělat i jiné varianty schematizace. Ty pak porovnat s fyzikálním modelem pro ověření nevhodnější varianty přístupu.



Obrázek 4.19: Průtoky a průběh hladin spadiště Miranova

Doporučení

- Změnit směrové uspořádání odtoku tak, aby nemohlo docházet k dopadu paprsku přímo do odtokového potrubí a tím eliminovat vznik typu proudění RI-R2.

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala hydraulikou nízkých kanalizačních spadišť a posouzením projektovaných spadišť pro pražskou stokovou síť. Druhá kapitola Literární rešerše přináší nutný teoretický základ potřebný pro návrh kanalizačního spadiště a jeho následné posouzení. Kapitola třetí Hydraulický návrh a posouzení poskytuje potřebné vzorce a vztahy pro návrh a posouzení spadiště.

Praktická část, neboli Kapitola čtvrtá Případové studie, je soubor tří posouzených spadišť navrhovaných podle Městských standardů platných na území hlavního města Prahy a projektovaných pro tuto lokalitu.

Kapitola 4.1 Kruhové spadiště Karlín s obtokovým potrubím je typickým představitelem často používaného kruhového prefabrikovaného spadiště. Pro toto spadiště byl nalezen mezní průtok Q_{mez} a beztlakový kapacitní průtok Q_{bkap} . Z vyhodnocení tohoto spadiště i pro další průtoky vyplývá, že návrh podle vzorového příkladu uvedeného v Městských standardech pro hl. m. Prahu se ukázal být z několika důvodů nevhodný. Doporučením na zlepšení stavu je snížit hranu rozstříku pod úroveň přítokového potrubí a zlepšit tvar spadiště dle dráhy trajektorie paprsku.

Kapitola 4.2 Spadiště Rumunská s obtokovým potrubím je modifikovaným případem vzoru ze Standardů, kde je obtokové potrubí součástí spadišťové šachty. Tvar spadiště za hranou obtokového potrubí byl upraven podle trajektorie paprsku při beztlakovém kapacitním průtoku Q_{bkap} a díky tomu nevznikají při tomto průtoku problémy. Dále byl ověřen bezdeštný průtok Q_{spl} a nalezen mezní průtok Q_{mez} a průtok nezahlceného odtoku Q_{no} . Návrh a dispozice tohoto spadiště ověřuje vhodnost změny oproti vzoru ze Standardů, kdy byla upravena horní hrana obtokového potrubí podle obálky trajektorie paprsku při beztlakovém kapacitním průtoku.

V Kapitole 4.3 Spadiště Miranova bez obtokového potrubí dochází k posouzení stavby, u které je hlavní funkcí vytvoření výškového rozdílu mezi přítokem a odtokem. S ohledem na idealizaci byl nalezen mezní průtok Q_{mez} , průtok nezahlceného odtoku Q_{no} a beztlakový kapacitní průtok Q_{bkap} . Mezní průtok Q_{mez} vychází z určení hranice mezi typy proudění ve spadišťové šachtě. Míra utlumení energie η není dostatečná. Dochází k překonání výškového rozdílu proudem bez tlumení energie proudu. Závěrem tohoto posouzení je doporučení změny směrového uspořádání odtoku, aby nedocházelo k dopadu paprsku do odtokového potrubí a zlepšila se tak úroveň tlumení energie.

Součástí této práce jsou i přílohy, které obsahují 3D modely objektů ze čtvrté Kapitoly. Jsou přiloženy i inverzní 3D modely vhodné pro použití v modelování proudění CFD.

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

α	[-]	součinitel kinetické energie (Coriolisovo číslo)
α	[°]	úhel kruhové úseče částečného plnění
β	[-]	součinitel zahlcení vtoku
B	[m]	šířka v hladině
b	[m]	šířka kanálu
C	[m ^{0.5} /s]	Chézyho rychlostní součinitel
δ	[°]	úhel vektoru rychlosti s vodorovnou osou x
D	[m]	průměr
D_{in}	[m]	průměr přítokového potrubí
D_M	[m]	průměr spadišřové šachty
D_{out}	[m]	průměr odtokového potrubí
η	[-][%]	relativní účinnost
E_0	[m]	celková mechanická energie proudu vůči srovnávací rovině v přítokovém potrubí
Fr	[-]	Froudovo číslo
g	[m/s ²]	tíhové zrychlení
ΔH	[m]	energetický spád
H_0	[m]	energetická výška průřezu v přítokovém potrubí
h_0	[m]	hloubka v přítokovém potrubí
h_c	[m]	zúžená hloubka
h_k	[m]	kritická hloubka
H_d	[m]	energetická výška průřezu v odtokovém potrubí
h_d	[m]	hloubka v odtokovém potrubí
h_e	[m]	hloubka na přelivné hraně spadiště
h_p	[m]	hloubka vody ve spadišti
H_{out}	[m]	výška hranatého odtokového kanálu
I	[-]	bezrozměrný parametr, viz. Rovnice 3.14
i_{in}	[-][%]	sklon přítokového potrubí
i_{out}	[-][%]	sklon obtokového potrubí
$i_{out} \cdot L$	[m]	vertikální navýšení
k	[-]	součinitel bezpečnosti
n	[-]	Manningův drsnostní součinitel
O	[m]	omočený obvod
φ	[-]	součinitel rychlosti

ψ	[-]	součinitel zahlčení, viz. Rovnice 3.29
ψ_{ch}	[-]	součinitel počátku zahlčení, viz. Rovnice 3.28
Q	[m ³ /s]	průtok
Q^*	[-]	Froudovo číslo spadiště, viz. Rovnice 3.16
q_N	[-]	měrný průtok při rovnoměrném proudění, viz. Rovnice 3.1
Q_M	[m ³ /s]	kapacitní průtok vertikální šachtou
Q_{spl}	[m ³ /s]	bezdeštný průtok
Q_{mez}	[m ³ /s]	mezní průtok
Q_{no}	[m ³ /s]	průtok nezahlčeného odtoku
Q_{bkap}	[m ³ /s]	beztlakový kapacitní průtok
Q_M	[m ³ /s]	kapacitní průtok vertikální šachtou
R	[m]	hydraulický poloměr
R_{in}	[m]	poloměr přítokového potrubí
s	[m]	výška stupně ve spadišti
S	[m ²]	plocha
S_0	[m ²]	průřezová plocha proudu v přítokovém potrubí
S_d	[m ²]	průřezová plocha proudu v odtokovém potrubí
S_M	[m ²]	průřezová plocha šachty
S_c	[m ²]	průřezová plocha proudu při zúžené hloubce
t	[s]	čas
t	[m]	tloušťka paprsku
v_0	[m/s]	průřezová rychlost proudění v přítokovém potrubí
v_d	[m/s]	průřezová rychlost proudění v odtokovém potrubí
v_c	[m/s]	průřezová rychlost proudění při zúžené hloubce
v_p	[m/s]	rychlost proudění v šachtě
x	[m]	X souřadnice dolní obálky paprsku
ξ	[-]	součinitel ztráty vtokem
y_0	[-][%]	částečné plnění přítokového potrubí
y_d	[-][%]	částečné plnění odtokového potrubí
Y_e	[-]	relativní odtoková hloubka
z_d	[m]	Z souřadnice dolní obálky přepadového paprsku
z_h	[m]	Z souřadnice horní obálky přepadového paprsku

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ INFORMACÍ

Literatura

- [1] ČSN 75 6101. (2012) *Stokové sítě a kanalizační přípojky*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [2] Bareš, V., Pícek, T., Kuk, R. (2013) *Modelování funkce spadiště s přímým nátokem a vysokým hydraulickým spádem*. *Vodní hospodářství* 63(3): 83-88.
- [3] Camino, G. A., Zhu, D. Z., Rajaratnam, N. (2010) *Hydraulics of stacked drop manholes*. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000327, 537–552.
- [4] Chow, V. T. (1959) *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill. ISBN 07-010776-9
- [5] Granata, F. (2016) *Dropshaft cascades in urban drainage systems*. *Water Science and Technology*, 73(9), 2052–2059.
- [6] Granata, F. , de Marinis, G. , Gargano, R., Hager, W.H. (2011) *Hydraulics of Circular Drop Manholes*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(2): 102-111
- [7] Granata, F., Gargano, R., De Marinis, G., Hager, W. (2010). *Choking features of drop manholes in sewer systems*. University of Cassino, Italy.
- [8] Del Giudice, G., Gissoni, C., Rasulo, G. (2009) *Vortex Drop Shaft for Supercritical Flow*. In *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering* (s. 1515–1520). Springer Berlin Heidelberg.
- [9] Hager, W.H. (2010) *Wastewater hydraulic: Theory and Practise*. Springer, Berlin, Chapter 15
- [10] Havlík, V. (2020) *Hydraulické výpočty spadišť s přímým nátokem*. *Sovak: časopis oboru vodovodů a kanalizací*. Jílové u Prahy: J. Fučíková. č.7-8/2020. ISSN 1210–3039.
- [11] Havlík, V. (2020) *Režimy kruhových spadišť s přímým nátokem*. *Sovak: časopis oboru vodovodů a kanalizací*. Jílové u Prahy: J. Fučíková. č.11/2020. ISSN 1210–3039.
- [12] Haindl, K. (1964) *Spadiště s vlastním útlumem kinetické energie*. Patentový spis 109662, Úřad pro patenty a vynálezy ČSSR.
- [13] Chanson, H. (2004) *Hydraulics of Rectangular Dropshafts*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 130.
- [14] Christodoulou, G. (1991) *Drop Manholes in Supercritical Pipelines*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 117.

- [15] Kolář, V., Patočka, C., Bém, J., (1983) *Hydraulika*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury.
- [16] Ma, Y., Zhu, D. Z., Rajaratnam, N., van Duin, B. (2017) *Energy Dissipation in Circular Drop Manholes*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 143(12), 04017047.
- [17] De Martino, F., Gissoni, C., Hager, W.H. (2002) *Drop in Combined Sewer Manhole for Supercritical Flow*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 128(6): 397-400.
- [18] Regnerová, T. (2017) *Hydraulické řešení sdruženého objektu na stokové síti v lokalitě Tábor*. České vysoké učení technické, Praha.
- [19] Šindelářová, J. (2014) *Hydraulika vertikálních spadišť s přímým nátokem*. České vysoké učení technické, Praha
- [20] Williamson, S. (2001) *Drop structure design for wastewater and stormwater collection systems*. New York: Parsons Brinckerhoff.
- [21] Zapata, G. (2011) *Hydraulics of Plunging Drop Structures in Urban Drainage Systems*. University of Alberta.
- [22] Zhao, C., Zhu, D. Z., Rajaratnam, N. (2004) *Supercritical sewer flows at a combining junction: A model study of the Edworthy trunk junction*. Calgary, Alberta. J. Environ. Eng. Sci., 3(5), 343–353.

Internetové zdroje

- [23] Brno, *Městské standardy pro kanalizační zařízení*. aktualizace 22.12.2010. [online] [cit. 3.2.2021] Dostupné z: https://www.brno.cz/fileadmin/user_upload/sprava_mesta/magistrat_mesta_brna/OI/dokumenty/Standardy_pro_kanalizacni_zarizeni.pdf
- [24] *Hydraulika, HY2V přednášky*. [online] [cit. 10.4.2021] Dostupné z: <http://hydraulika.fsv.cvut.cz/>
- [25] Olomouc, *Městské standardy kanalizační sítě*. schváleno listopad 2016. [online] [cit. 3.2.2021] Dostupné z: <https://www.olomouc.eu/o-meste/uzemni-planovani/pro-projektanty/standardy-kanal/>
- [26] Praha, *Městské standardy vodovodů a kanalizací na území hl. m. Prahy*. 6. aktualizace leden 2020. [online][cit. 3.2.2021] Dostupné z: <http://www.pvs.cz/pro-zakazniky/mestske-standardy/>

SEZNAM POUŽITÉHO SOFTWARE

1. Microsoft Office
2. Autodesk AutoCAD 2020
3. T_EXmaker, MiK_TE_X
4. PDF-XChange Editor

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Stupeň ve dně	5
2.2	Vzorový řez spadištěm, upraveno [9]	6
2.3	Spadiště s přímým nátokem a obtokovým potrubím, upraveno [26]	7
2.4	Dvoukomorové spadiště, řez, upraveno [21]	8
2.5	Půdorys dvoukomorového spadiště	8
2.6	Graf částečného plnění kruhového průřezu potrubí	9
2.7	Přepadový paprsek, upraveno [9]	10
2.8	Spadišťová šachta, upraveno [9]	11
2.9	Základní typy proudění vody ve spadišti, upraveno [16]	12
2.10	Podtypy R I proudění vody ve spadišti s volnou hladinou, upraveno [5]	12
3.1	Profily přítoku - kruhová úseč a přítokový kanál	15
3.2	Porovnání hladiny rovnoměrného proudění s kritickou hloubkou h_k	15
3.3	Přepadový paprsek, upraveno [9]	16
3.4	Zahlcený nezatopený odtok	18
3.5	Spadiště s přímým nátokem	19
4.1	Spadiště Karlín	22
4.2	Paprsek při průtoku Q_{mez}	23
4.3	Paprsek při beztlakovém kapacitním průtoku Q_{bkap}	25
4.4	Průtoky a průběh hladin spadiště Karlín	27
4.5	Idealizace hranaté šachty	28
4.6	Spadiště Rumunská	28
4.7	Paprsek při průtoku Q_{spl}	30
4.8	Paprsek při průtoku Q_{mez}	31
4.9	Paprsek při průtoku Q_{no}	32
4.10	Paprsek při beztlakovém kapacitním průtoku Q_{bkap}	33
4.11	Porovnání trajektorie dolních obálek paprsků	34
4.12	Průtoky a průběh hladin spadiště Rumunská	35
4.13	Idealizace šachetního prostoru	36
4.14	Spadiště Miranova	36
4.15	Trajektorie paprsku při Q_{bkap}	38
4.16	Paprsek při průtoku Q_{no}	39
4.17	Trajektorie paprsků	41
4.18	Schéma idealizace	41
4.19	Průtoky a průběh hladin spadiště Miranova	42

SEZNAM TABULEK

4.1	Částečné plnění přítokového potrubí podle Hagera [9]	23
4.2	Částečné plnění přítokového potrubí přes geometrii kružnice, viz. Obrázek 3.2	23
4.3	Posouzení spadišové šachty Q_{mez}	23
4.4	Posouzení odtoku a účinnosti tlumení	24
4.5	Vertikální šachta	25
4.6	Zatopení šachty při Q_{bkap}	25
4.7	Posouzení spadišové šachty	26
4.8	Účinnosti tlumení energie	26
4.9	Částečné plnění přítokového potrubí podle Hagera [9]	29
4.10	Částečné plnění přítokového potrubí přes geometrii kružnice, viz. Obrázek 3.2	29
4.11	Posouzení spadišové šachty Q_{spl}	29
4.12	Posouzení odtoku a účinnosti tlumení	30
4.13	Trajektorie paprsku při Q_{spl}	30
4.14	Trajektorie paprsku při Q_{mez} , viz. Kapitola 3.2	31
4.15	Částečné plnění přítokového potrubí pro Q_{mez} , podle Hagera [9]	31
4.16	Posouzení spadišové šachty pro Q_{mez}	31
4.17	průtok nezahlceného odtoku Q_{no}	32
4.18	Parametry přítokového potrubí při Q_{no} podle Hagera [9]	32
4.19	Vertikální šachta	33
4.20	Zatopení šachty při Q_{bkap}	33
4.21	Účinnosti tlumení energie	34
4.22	Částečné plnění přítokového potrubí Q_{bkap} , podle Hagera [9]	37
4.23	Částečné plnění přítokového potrubí přes geometrii kružnice, viz. Obrázek 3.2	37
4.24	Vertikální šachta	37
4.25	Zatopení šachty při Q_{bkap}	37
4.26	Posouzení přítoku a odtoku	38
4.27	Posouzení spadišové šachty při Q_{bkap}	38
4.28	Průtok nezahlceného odtoku Q_{no}	39
4.29	Částečné plnění přítokového potrubí Q_{no} , podle Hagera [9]	39
4.30	Posouzení spadišové šachty při Q_{no}	39
4.31	Analýza částečné plnění přítokového potrubí, podle Hagera [9]	40
4.32	Analýza hydraulických parametrů spadiště	40
4.33	Účinnosti tlumení energie	41

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Karlín 3D model kruhového spadiště s obtokovým potrubím

Příloha B: Karlín 3D inverzní model kruhového spadiště pro CFD

Příloha C: Rumunská 3D model spadiště s obtokovým potrubím

Příloha D: Rumunská 3D inverzní model spadiště pro CFD

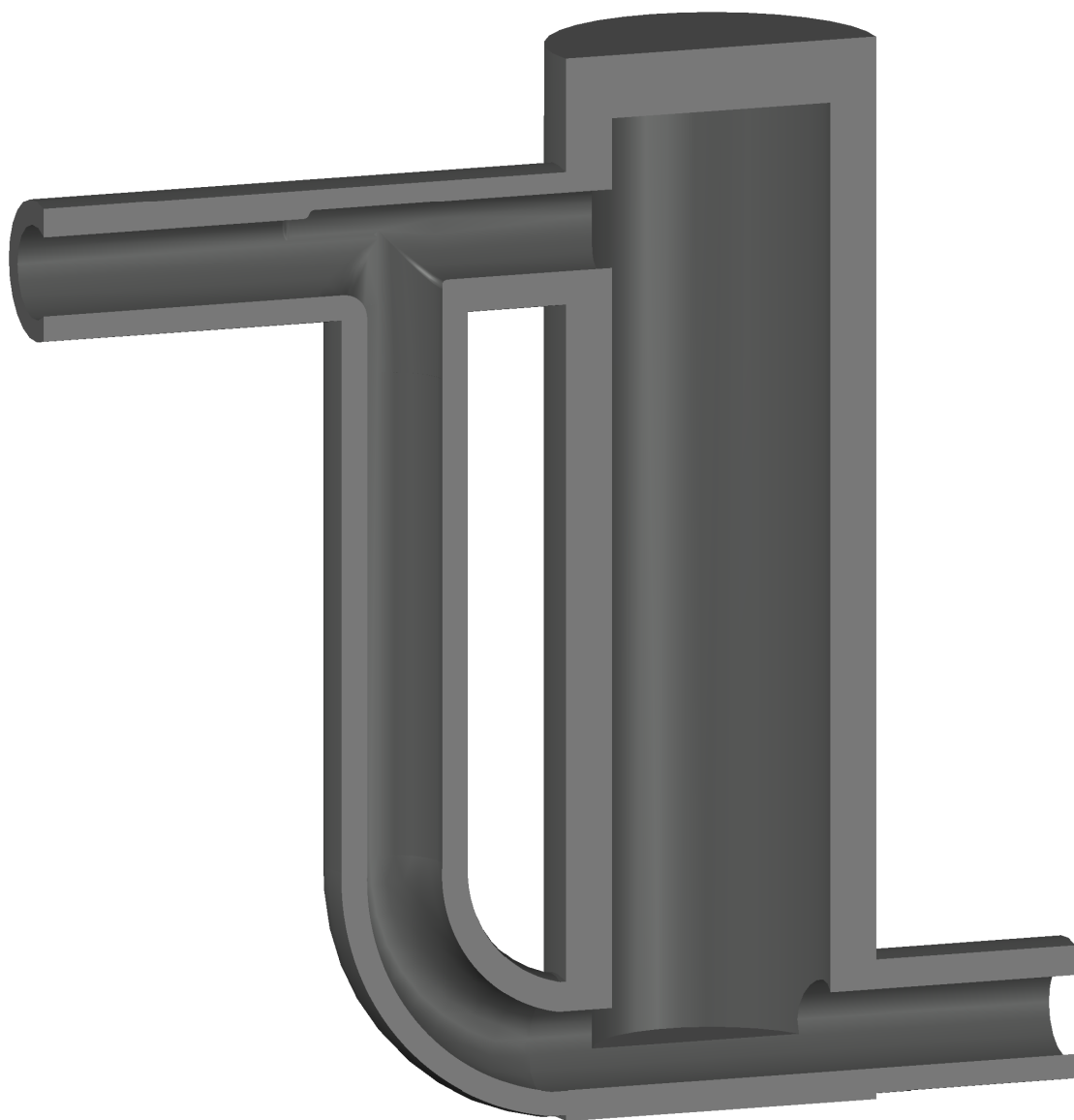
Příloha E: Miranova 3D model spadiště bez obtokového potrubí

Příloha F: Miranova 3D inverzní model spadiště pro CFD

3D modely vytvořeny na základě stavebních výkresů projektové dokumentace, Sweco Hydroprojekt a.s.

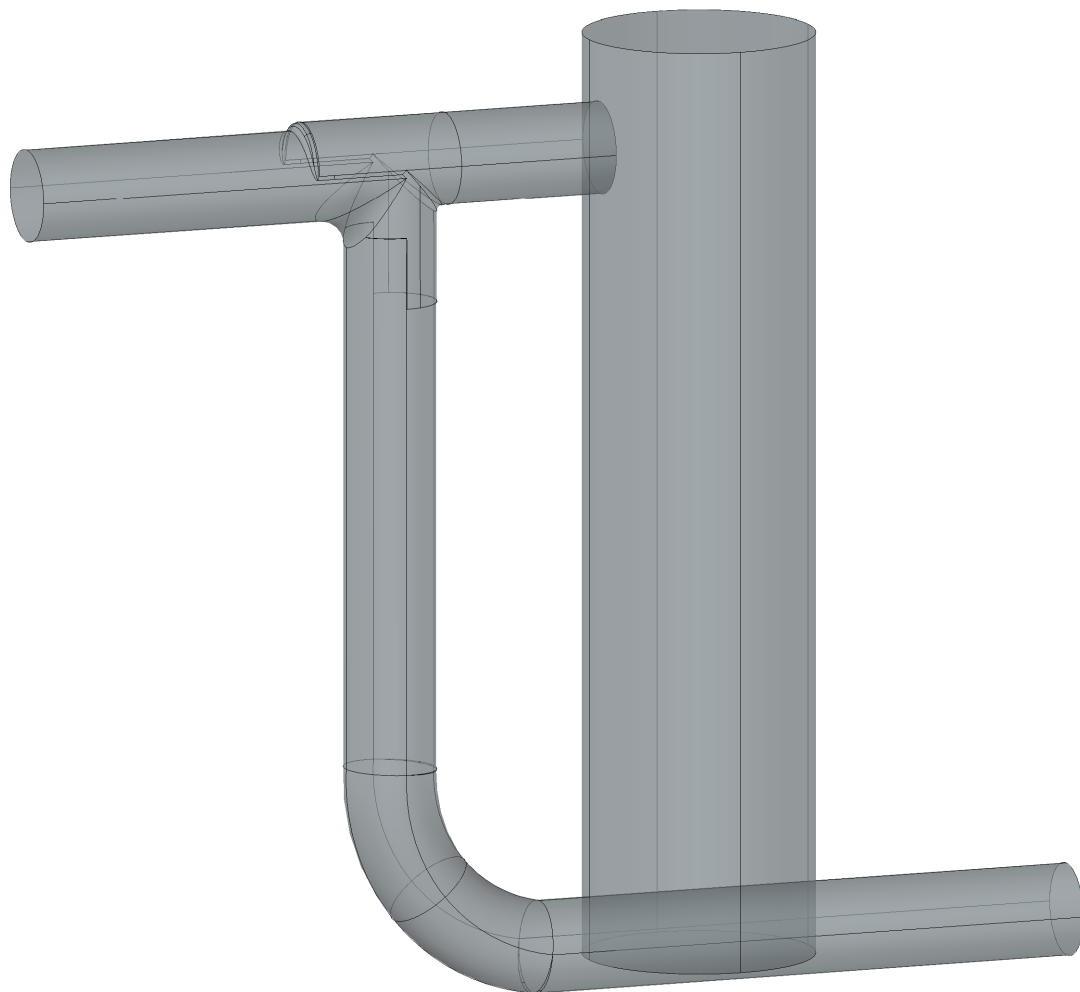
Příloha A

Karlín 3D model kruhového spadiště s obtokovým potrubím



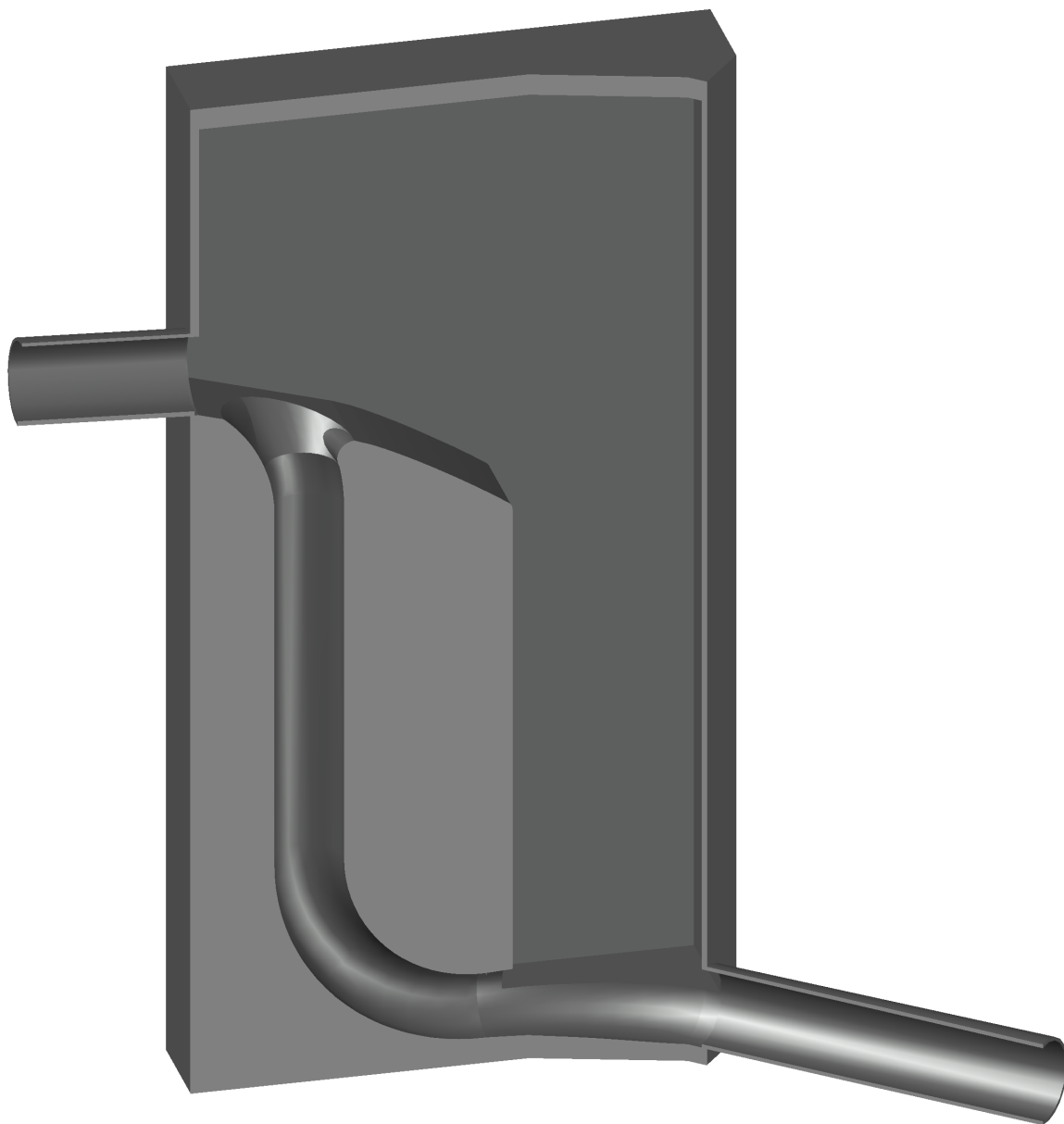
Příloha B

Karlín 3D inverzní model kruhového spadiště pro CFD



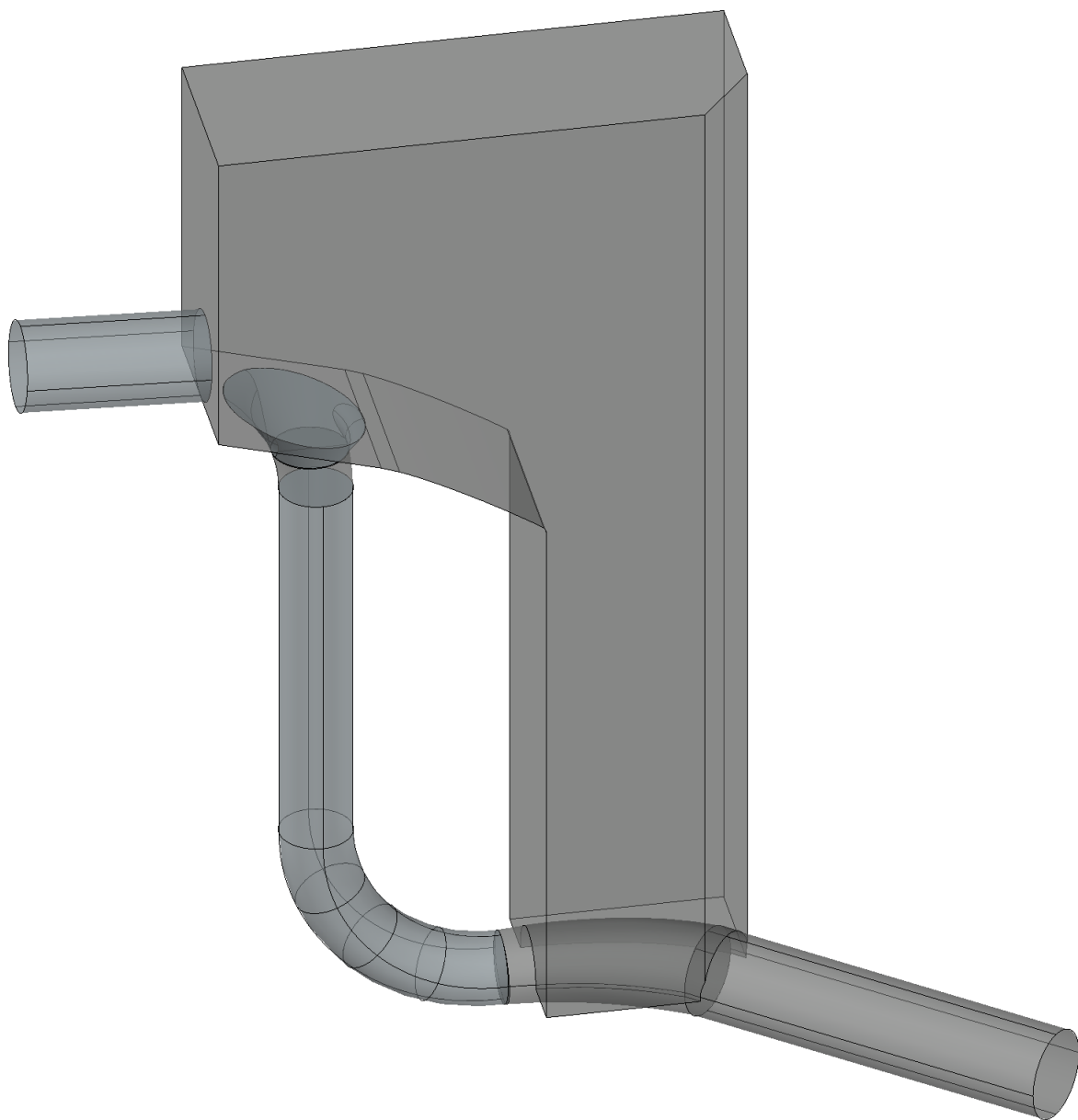
Příloha C

Rumunská 3D model spadiště s obtokovým potrubím



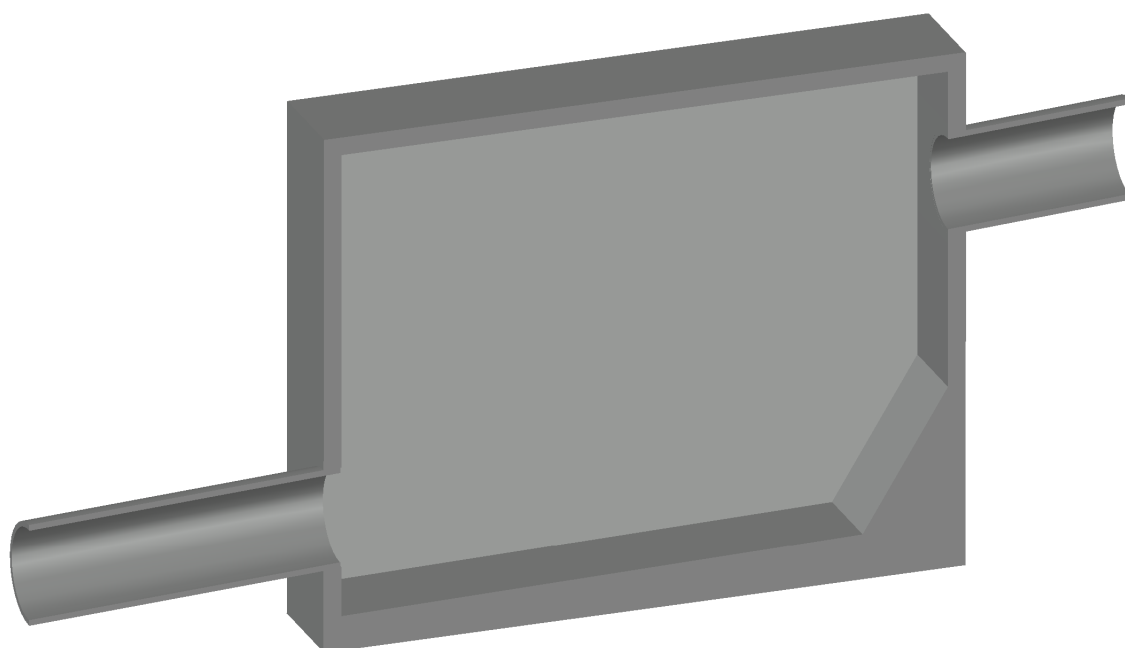
Příloha D

Rumunská 3D inverzní model spadiště pro CFD



Příloha E

Miranova 3D model spadiště bez obtokového potrubí



Příloha F

Miranova 3D inverzní model spadiště pro CFD

