

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra hydrauliky a hydrologie



Bakalářská práce

**Studie odtokových poměrů
Bezdrevského potoka v Netolicích**

Vypracoval: Pavel Pelikán

Vedoucí práce: doc. Ing. Aleš Havlík, CSc.

Květen 2019



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Pelikán Jméno: Pavel Osobní číslo: 460447

Zadávací katedra: 11141 - Katedra hydrauliky a hydrologie

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Studie odtokových poměrů Bezdrevského potoka v Netolicích

Název bakalářské práce anglicky: Study of runoff conditions of Bezdrevský potok in Netolice

Pokyny pro vypracování:

Posouzení odtokových poměrů Bezdrevského potoka v Netolicích pomocí 2D matematického modelu proudění s volnou hladinou v otevřených korytech HEC-RAS. Posouzení stávající míry protipovodňové ochrany. Zpracování koncepčního návrhu možnosti zvýšení míry protipovodňové ochrany obce včetně hydraulického posouzení.

Seznam doporučené literatury:

HEC-RAS version 5.0, 2D Modeling User's Manual. US Army Corps of Engineers. USA, Davis, 2010

Jméno vedoucího bakalářské práce: doc. Ing. Aleš Havlík, CSc.

Datum zadání bakalářské práce: 28. 2. 2019

Termín odevzdání bakalářské práce: 26. 5 2019

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“.

1.3.2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem veškeré použité informační zdroje, v souladu s metodickou příručkou ČVUT 1/2009 "O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací".

V Praze dne 22.5. 2019

.....

Pavel Pelikán
podpis autora

Poděkování

Děkuji doc. Ing Aleši Havlíkovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a připomínky a za čas strávený při konzultacích této bakalářské práce. Dále děkuji pracovníkům státního podniku Povodí Vltavy za poskytnuté podklady a pomoc.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá posouzením odtokových poměrů Bezdrevského potoka v Netolicích. Součástí práce je popis zájmového území a shrnutí historických povodní na území Čech. Další část práce je věnována hydraulice otevřených koryt a matematickému modelování proudění vody. Výpočet odtokových poměrů je proveden za pomoci dvojrozměrného modelu proudění v programu HEC-RAS.

Klíčová slova

2D matematické modelování proudění vody, HEC–RAS, hydraulika otevřených koryt, nerovnoměrné proudění, protipovodňová ochrana

Anotation

This bachelor thesis is an evaluation of the runoff conditions of Bezdrevský potok in Netolice. A part of this thesis is the description of the area of interest and summary of the historical floods in Bohemia. Another part of this thesis is dedicated to open channel hydraulics and mathematical modelling of water flow. The computation of runoff conditions is carried out using two-dimensional model in the software HEC-RAS.

Key words

2D mathematical modelling of water flow, HEC–RAS, open channel hydraulics, unsteady flow, flood protection

Obsah

| | | |
|----|--|----|
| 1. | ÚVOD | 8 |
| 2. | POPIS ŘEŠENÉHO ÚZEMÍ | 9 |
| | 2.1 Bezdrevský potok | 9 |
| | 2.2 Podnebí a hydrologické poměry | 11 |
| | 2.3 Geologické, hydrogeologické a pedologické poměry | 14 |
| 3. | ZKOUMANÝ ÚSEK | 16 |
| | 3.1 Podrobný popis zkoumaného úseku | 16 |
| | 3.2 Objekty | 19 |
| | 3.2.1 Mostní objekty | 19 |
| | 3.2.2 Stupně ve dně..... | 21 |
| | 3.3 Záplavové území města Netolice | 22 |
| 4. | POVODŇOVÉ UDÁLOSTI..... | 25 |
| | 4.1 Historické povodně..... | 25 |
| | 4.2 Povodně 20. a 21. století | 25 |
| 5. | HYDRAULIKA OTEVŘENÝCH KORYT | 28 |
| | 5.1 Základní pojmy..... | 28 |
| | 5.2 Proudění v otevřeném korytě..... | 30 |
| | 5.3 Řešení nerovnoměrného proudění..... | 31 |
| | 5.4 Výpočetní program HEC-RAS..... | 33 |
| | 5.5 Výpočet 2D proudění a řídicí rovnice matematického modelu..... | 34 |
| 6. | TVORBA MATEMATICKÉHO MODELU | 36 |
| | 6.1 Digitální model terénu a geodetické podklady..... | 36 |

| | | |
|-----|--|----|
| 6.2 | Tvorba výpočetní sítě | 37 |
| 6.3 | Modelování objektů..... | 37 |
| 6.4 | Odpor povrchu..... | 38 |
| 6.5 | Okrajové podmínky | 38 |
| 7. | VÝPOČET | 40 |
| 7.1 | Difuzní vlna | 40 |
| 7.2 | Kompletní pohybové rovnice | 40 |
| 7.3 | Vlastní výpočet..... | 41 |
| 8. | ANALÝZA VÝSLEDKŮ A POZNATKŮ | 42 |
| 8.1 | Posouzení stávající míry protipovodňové ochrany..... | 42 |
| 8.2 | Porovnání výsledků modelů | 42 |
| 8.3 | Posouzení zájmového objektu | 44 |
| 8.4 | Koncepční návrh zvýšení protipovodňové ochrany | 45 |
| 9. | ZÁVĚR | 47 |
| 10. | POUŽITÁ LITERATURA..... | 48 |
| 11. | SEZNAM PŘÍLOH..... | 51 |
| 12. | SEZNAM VZTAHŮ A ROVNIC..... | 52 |
| 13. | SEZNAM OBRÁZKŮ | 53 |
| 14. | SEZNAM TABULEK..... | 54 |

1. ÚVOD

Přestože v posledních pár letech nedošlo na území Čech k velkým povodním, je stále nutné mít na paměti existenci těchto přírodních katastrof. Nejefektivnější formou ochrany před povodněmi jsou preventivní protipovodňová opatření. Pro dokonalejší návrh těchto preventivních opatření, ale i k posouzení stávající míry ochrany před povodněmi, vznikají studie odtokových poměrů.

Tato bakalářská práce se věnuje odtokovým poměrům Bezdrevského potoka v Netolicích. Cílem práce je posoudit stávající míru protipovodňové ochrany. Na základě posouzení je zpracován koncepční návrh možnosti zvýšení protipovodňové ochrany. Studie odtokových poměrů je provedena za pomoci 2D matematického modelu proudění s volnou hladinou HEC-RAS.

V práci je představen Bezdrevský potok včetně jeho povodí. Zmíněny jsou významné historické i novodobé povodňové události na území Čech. Část práce popisuje problematiku hydrauliky otevřených koryt, zejména řešení ustáleného a neustáleného nerovnoměrného proudění. Praktická část se skládá z vytvoření výpočetního modelu, analýzy průběhu výpočtu a následné interpretace výsledků. Na základě výsledků je zpracováno koncepční řešení protipovodňové ochrany.

Studie se zvláště zabývá zájmovým objektem na ř. km 26,232. Tím je zeď oddělující koryto vodního toku od přilehlé zahrady. Zbouráním zdi a jejím posunutím by došlo k zvětšení průtočného profilu. Součástí práce je porovnání současného stavu a zamýšlené úpravy včetně hydraulického posouzení. Porovnání je možné na základě výpočtu 2D modelů pro průtoky s dobou opakování 5, 20 a 100 let.

2. POPIS ŘEŠENÉHO ÚZEMÍ

Tato kapitola představuje zájmového území. Popisuje tok Bezdrevského potoka a jeho okolí. Dále je věnována pozornost podnebí a hydrologickým poměrům. Zmíněny jsou též geologické, hydrogeologické a pedologické poměry v povodí potoka.

2.1 Bezdrevský potok

Název toku: Bezdrevský potok

Identifikátor vodního toku: 116380000100 [1]

Číslo hydrologického pořadí toku: 1-06-03-0490-2-00 [1]

Kraj: Jihočeský

Okres: České Budějovice, Prachatice

Správce vodního toku: Povodí Vltavy, s.p.

Povodí Bezdrevského potoka je součástí povodí Vltavy, které náleží hydrologicky k povodí Labe. Potok je levostranným přítokem řeky Vltavy, do které se vlévá na jejím říčním kilometru 230,95. Celková délka toku je 43,13 km, plocha povodí měří 280,42 km². Délka údolí je 37,9 km s lesnatostí povodí 20 %. Nejvyšší místa v povodí dosahují výšky kolem 800 m n. m., nejnižší místo (ústí do řeky Vltavy) je ve výšce 371 m n. m.



Obrázek 1 - Trasa Bezdrevského potoka

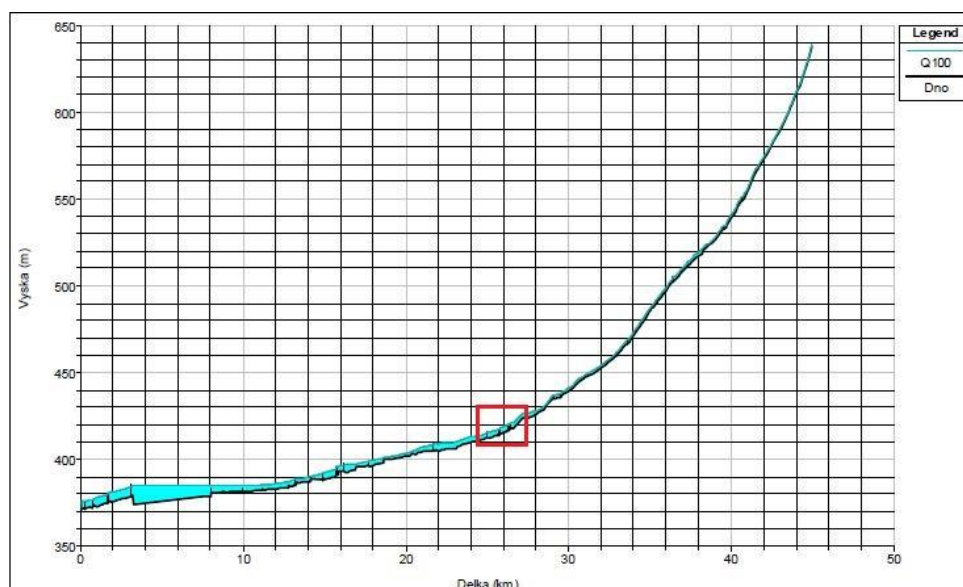
Potok pramení nedaleko města Prachatic, severovýchodně od obce Smědeč v nadmořské výšce 671,55 m n. m. Protéká skrz obec Třešňový Újezdec a mezi loukami teče severně k městyso Lhenice. Dále teče mezi vesnickými usedlostmi a pokračuje k městu Netolice. Za Netolicemi se potok ubírá východním směrem. Protéká dalšími obcemi, jmenovitě: Podeřiště, Lékařova Lhota a Sedlec. U vesnice Zbudov mění tok směr a dále pokračuje jihovýchodním směrem k městu Zliv. Do Vltavy se vlévá mezi vesnicemi Bavorovice a Opatovice.

Bezdrevský potok napájí celou řadu rybníků. Na horním toku je to bočně napájený Brychovský rybník. U města Netolice rybník Mnich, dále pak rybníky: Hlavatecký, Dvorský, Mlýnský a Zlivský. Největším rybníkem na toku je rybník Bezdrev, mezi městy Zliv a Hluboká nad Vltavou.

Hlavní přítoky Bezdrevského potoka jsou potoky Třebánka, Melhutka, Mlýnský, Mydlovarský, a Olešník. Zde je nutné zmínit, že na většině potoků jsou postaveny rybníky nebo rybníční soustavy. Přítoky do Bezdrevského potoka jsou tedy ovlivněny manipulací na těchto vodních dílech. Po celé délce vodního toku se do potoka vlévá velké množství bezejmenných přítoků.

Na obrázku níže (Obrázek 2) je přehledně znázorněn podélný profil Bezdrevského potoka. Modrou čarou je zobrazena hladina povodňového průtoku Q_{100} . Červeně je vyznačen zájmový úsek toku pro tuto studii.

Z podélného profilu můžeme rozdělit tok na dva větší úseky. Od pramene až k městu Netolice (rybník Mnich, ř. km 26,650), má tok průměrný sklon 8,6 ‰. Od Netolic po ústí do Vltavy je sklon 1,77 ‰. Absolutní výškový rozdíl pramene a ústí potoka je 270 metrů, tomu odpovídá průměrný podélný sklon 5,9 ‰.

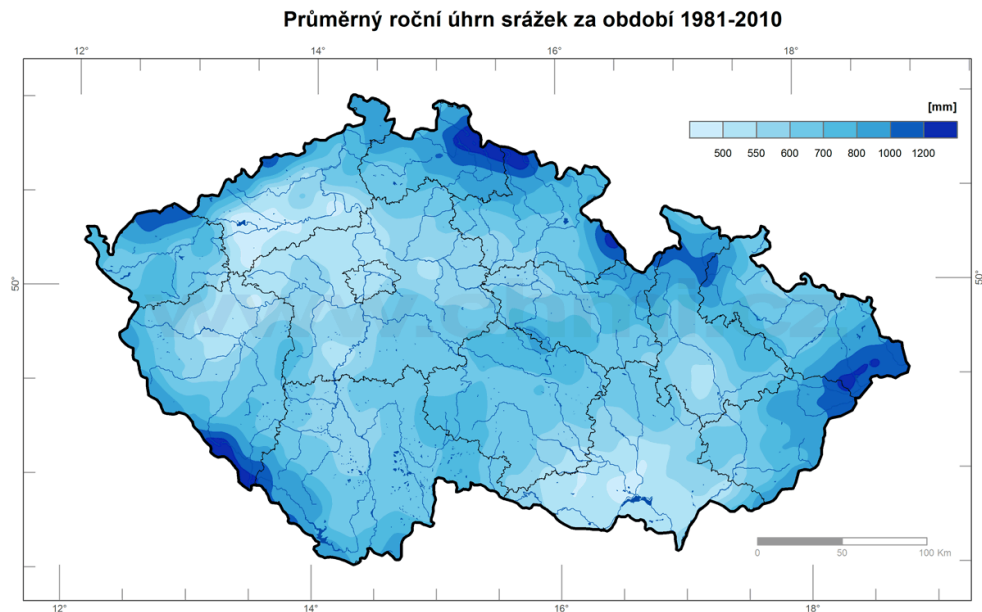


Obrázek 2 – Přehledný podélný profil Bezdrevského potoka

2.2 Podnebí a hydrologické poměry

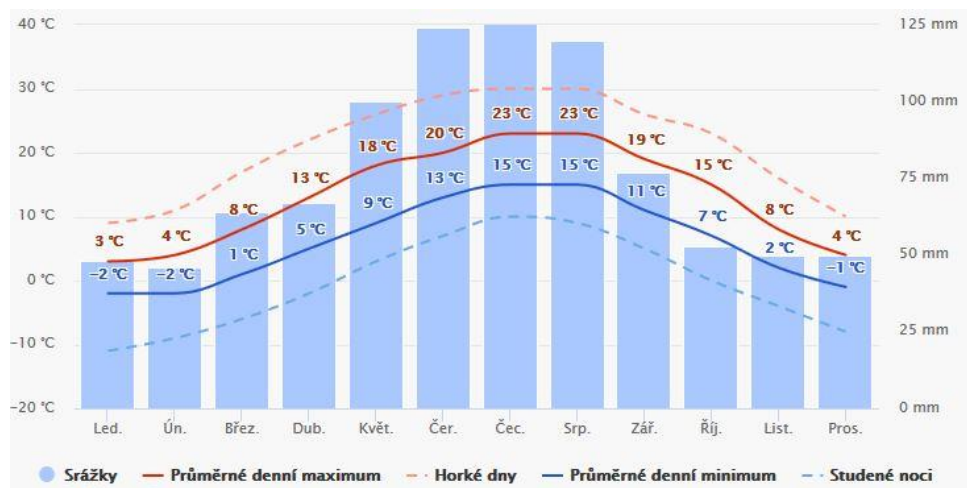
Z klimatického hlediska se nachází Česká republika v mírné podnebné oblasti s kontinentálními vlivy. To znamená, že zde dochází k pravidelnému střídání čtyř ročních období, ostatně jako v celé střední Evropě. Převládají zde západní větry, na většině území napadne za rok 500–700 mm srážek. Právě klimatické podmínky zásadně utvářejí vodní režim krajiny. [2]

Průměrný roční úhrn srážek v povodí Bezdrevského potoka je 611 mm, odtokový součinitel je 0,20 a specifický odtok z povodí je 3,82 l/s.km². Povodí potoka náleží z hlediska spadlých srážek k republikovému průměru. [3]



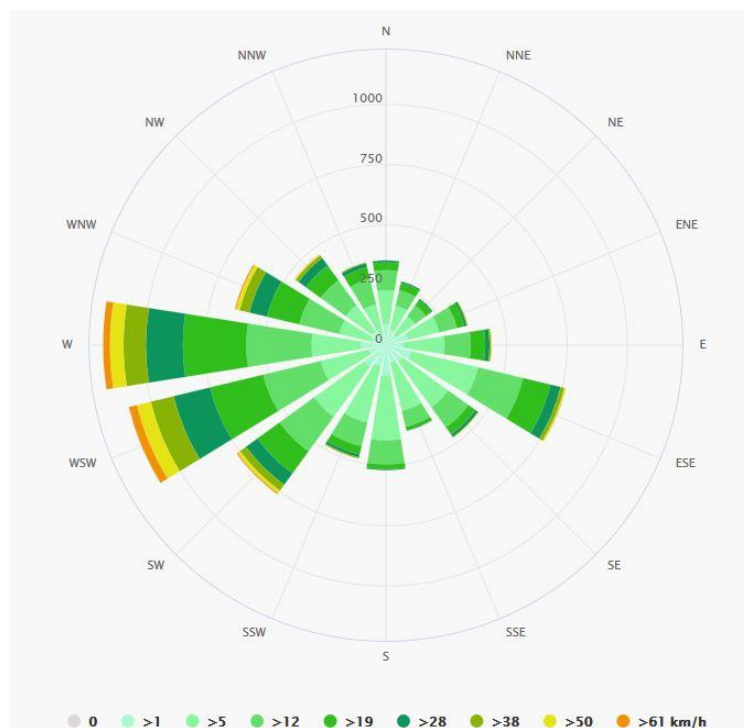
Obrázek 3 – Mapa průměrného ročního úhrnu srážek 1981-2010 [2]

Dlouhodobé pozorování v Netolicích potvrzuje věty z úvodu podkapitoly. Průměrné teploty a úhrny srážek jsou vyobrazeny na grafu dole (Obrázek 4). Data pro sestavení grafu byla sbírána po 30 let. Mezi nejdeštivější měsíce v roce patří červen, červenec a srpen. V těchto měsících proto nejčastěji dochází k povodňovým situacím. [4]



Obrázek 4 – Průměrné roční teploty a úhrn srážek v Netolicích [4]

Větrná růžice (Obrázek 5) ukazuje, že nejčastěji vítr fouká přímo ze západu, popřípadě z jihozápadu. Průměrná rychlost větru v 10 metrech nad zemí je 2,75 m/s, to odpovídá 10 km/h. [4]



Obrázek 5 – Větrná růžice pro Netolice [4]

Bezdrevský potok je možné zařadit mezi vodní toky dešťovo-sněhového typu. Hydrologické poměry celého povodí se vyvíjejí v závislosti na hlavních činitelích utvářejících vodní poměry, tj. na srážkách, geo-morfologii, geologické skladbě a půdním krytu. Tyto poměry jsou popsány níže.

Na toku Bezdrevského potoka se nachází dvě limnigrafické stanice. Stanice Netolice (provozuje Povodí Vltavy) slouží povodňové službě. Další stanice Lékařova Lhota (provozuje ČHMÚ), slouží pro režimová měření a podle ní jsou vyhodnocována a odvozována hydrologická data. Stanice Lékařova Lhota je podstatně starší než stanice Netolice, ale vzhledem k jejímu obtékání za větších povodní není reprezentativní pro vyhodnocování povodňových průtoků.

Stanice Netolice je situována na levém břehu před silničním mostem, na ř. km. 26,220. Hlásný profil č.95a byl postaven v letech 2007 a 2008. Řadí se do kategorie B – doplňkové hlásné profily. Tyto profily na vodních tocích jsou nezbytné k řízení opatření pro ochranu před povodněmi na regionální úrovni. Přístrojově je vybaven automatickou měrnou stanicí s tlakovými sondami sledujícími vodní stav. Platnost SPA (stupně povodňové aktivity) je od hlásného profilu až po ústí potoka do řeky

Vltavy. N-leté průtoky v profilu je možné vidět v následující tabulce (Tabulka 1). [5]
[6]

Tabulka 1 – N-leté průtoky v hlásném profilu č.95a [4]

| N-letost | Q₁ | Q₅ | Q₁₀ | Q₅₀ | Q₁₀₀ |
|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| [m ³ /s] | 13 | 32 | 43 | 77 | 95 |

Dlouhodobý průměrný roční průtok stanicí je 0,482 m³/s. Ten odpovídá vodnímu stavu 79 cm. Nejvyšší stupeň povodňové aktivity, stav ohrožení, je vyhlášován při průtoku 19,5 m³/s, při stavu 200 cm. [6]

N-leté průtoky v jednotlivých profilech Bezdrevského potoka jsou zobrazeny níže v tabulce (Tabulka 2). Průtoky byly stanoveny ČHMÚ.

Tabulka 2 – N-leté průtoky ČHMÚ

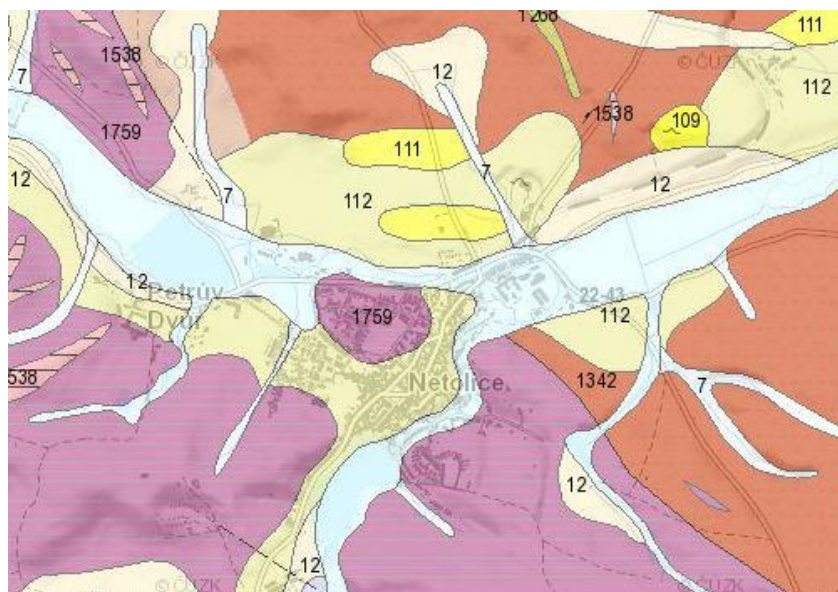
| Profil | Staničení | Plocha | Q₁ | Q₂ | Q₅ | Q₁₀ | Q₂₀ | Q₅₀ | Q₁₀₀ |
|------------------------------------|------------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| | [km] | [km ²] | [m ³ /s] | [m ³ /s] | [m ³ /s] | [m ³ /s] | [m ³ /s] | [m ³ /s] | [m ³ /s] |
| ústí do Vltavy nad Mydlovarským p. | 0.000 | 280.420 | 24 | 34 | 53 | 71 | 93 | 129 | 160 |
| nad Malovickým p. | 7.000 | 219.200 | 20 | 30 | 47 | 63 | 82 | 113 | 140 |
| nad Třebánkou | 13.259 | 130.740 | 16 | 24 | 38 | 51 | 67 | 92 | 115 |
| nad Melhutkou | 24.954 | 79.780 | 13 | 20 | 32 | 43 | 56 | 77 | 95 |
| hráz rybníka u Smědečku | 27.734 | 39.430 | 8.1 | 13 | 20 | 28 | 36 | 50 | 62 |
| | 44.600 | 1.880 | 1.4 | 2.3 | 3.6 | 5.0 | 6.6 | 9.3 | 11 |

2.3 Geologické, hydrogeologické a pedologické poměry

Geologické poměry předurčují geomorfologické a hydrogeologické charakteristiky v dané oblasti. Mají vliv na tvar říční sítě, ovlivňují intenzitu zvětrávání, materiál dna či chemické složení vody. Hydrogeologické poměry ukazují možnosti zásob podzemní vody a přímo ovlivňují odtokové poměry území. Pedologické poměry v oblasti rozdělují odtok na povrchový a podpovrchový, popisují mimo jiné možnost infiltrace do daného půdního profilu. Zmíněné poměry mají přímý vliv na vývoj vodních toků.

Území Netolic se z geologického hlediska skládá z několika částí. Zobrazeny jsou názorně na Obrázku 6. Bezdrevský potok a jeho blízké okolí (světle modrá) je

tvořeno nivním sedimentem, útvar kvartéru. Tato část spadá do oddělení holocén. Další část území (světle žlutá) patří k oddělení miocén, útvar neogénu. Tvoří jej tyto horniny: bazální slepence a pískovce, jíly, jílovité písky, pískovce a uhelné jílovce. Okolí Netolice (fialová) je zejména tvořeno horninovým typem magmatit hlubinný, z éry paleozoika. Povodí Bezdrevského potoka je převážně tvořeno metamorfity (pararula, granulit). [7]



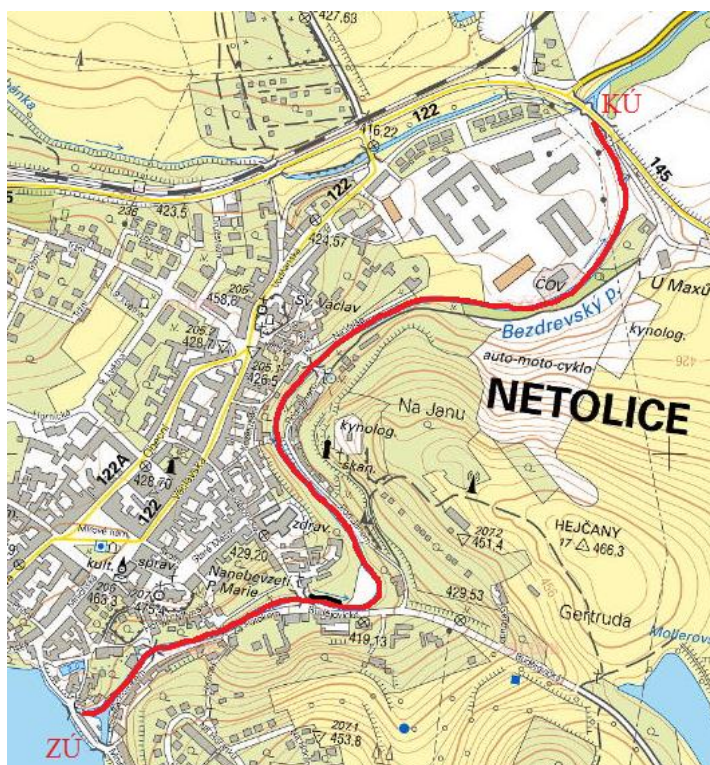
Obrázek 6 – Geologická mapa Netolice [7]

V horní části povodí Bezdrevského potoka lze hydrogeologické prostředí charakterizovat jako hydrogeologický masiv s puklinovou propustností. V dolní části povodí se jedná o hydrogeologický masiv s pórovo-puklinovou propustností. Ve velmi malé části povodí se vyskytují dusíkovo-kyslíkové vody s radonem. [7]

Pedologické poměry v povodí je možné popsat pomocí půdních map Ministerstva životního prostředí. Povodí toku se nachází v území, kde jsou zastoupeny tři větší skupiny půd. První je skupina hnědých půd – kambizemě, druhá skupina oglejených půd – pseudogleje. Třetí skupinou jsou hydromorfní půdy – gleje. [8]

3. ZKOUMANÝ ÚSEK

Zájmovým úsekem v této práci je část Bezdrevského potoka protékající městem Netolice. Úsek je vymezen výtokem z rybníka Mnich (ř. km. 26,599), dolní část řešeného úseku končí za silničním mostem (ř. km. 24,974). Černě je na obrázku (Obrázek 7) vyznačeno umístění zájmového objektu.



Obrázek 7 – Vyznačený zájmový úsek v katastrální mapě

3.1 Podrobný popis zkoumaného úseku

Po výtoku z rybníka potok dále pokračuje směrem do intravilánu. Koryto v této části je opevněno na pravém břehu, levý břeh je vymezen opěrnou zídkou, dále dokonce stěnou neobývané budovy. Vliv na proudění vody v této části toku mohou mít travní a keřové porosty. Některé objekty zástavby jsou ohroženy povodňovým průtokem Q_{100} . Jeden ze stavebních objektů může být ohrožen již při průtoku Q_{20} . Dále po toku se nachází silniční most na ř. km. 26,484.



Obrázek 8 – Pohled na koryto směrem k rybníku Mnich

Za mostem na levém břehu je postavena opěrná zeď. Koryto je upravené, opevněné na obou březích. Při levém břehu se nachází několik zahrad, rozdělených ploty. K zahradám navazují postavené domy. Na pravém břehu je zástavba od toku vzdálena přibližně 10 m. Tato část toku končí lávkou na ř. km. 26,380. Pod lávkou pokračuje dále upravené koryto, v lichoběžníkovém profilu. Oba břehové svahy jsou opevněny. Nachází se zde stupeň ve dně. Koryto pokračuje přímým směrem až k dalšímu silničnímu mostu.



Obrázek 9 – Pohled proti proudu od silničního mostu

Přímo za silničním mostem je koryto rozšířeno, na pravé straně jej tvoří opěrná zeď. Nad zdí vede silnice II. třídy. Levou břehovou hranu tvoří zeď oddělující koryto a pozemek zahrady. Tato zeď je zájmovým objektem této studie. Zhruba v polovině délky je zeď přerušena vstupem na zahradu. Koryto dále pokračuje severním směrem a je více zaříznuto do okolního terénu. Má pravidelný lichoběžníkový tvar.



Obrázek 10 – Povodeň 2013 u zájmového objektu

Na levém břehu se nachází zahrady, zástavba není ohrožena povodňovým průtokem. Pravá břehová linie je tvořena silnicí. Oba břehové svahy jsou porostlé trávou. Níže po toku stojí několik obytných budov a garáže.

U lávky na ř. km 25,840 je levý břeh opevněn. Toto opevnění dále pokračuje střídavě až k dalšímu silničnímu mostu. Opevněno je i okolí kamenného prahu, který byl postaven přibližně 45 metrů před mostem.

Tok pokračuje severozápadním směrem, koryto je tvořeno pravidelným lichoběžníkovým profilem. Terén na pravém břehu se zvedá směrem k hradišti Na Jánů, levá strana potoka je mnohem plošší. Tam se nalézá průmyslový areál, který je ohrožen již při průtoku Q_5 . Součástí areálu je i čistírna odpadních vod, situována přímo na levém břehu potoka. Potok obtéká areál a dále pokračuje až k silničnímu mostu, kde zájmový úsek této studie končí (ř. km 24,990).

3.2 Objekty

Zkoumaný úsek toku obsahuje několik stavebních objektů, které je důležité blíže popsat vzhledem k jejich vlivu na výpočet odtokových poměrů. Jedná se celkem o čtyři mosty, dvě lávky pro pěší a dva stupně ve dně.

3.2.1 Mostní objekty

V následující tabulce (Tabulka 3) jsou uvedeny všechny mostní objekty. Pro další výpočet jsou zejména důležité výšky dolní a horní hrany mostovky. Uvedeno je i příslušné staničení a výška dna jednotlivých objektů.

Tabulka 3 – Seznam mostních objektů v řešeném úseku

| Staničení [ř. km] | Objekt | dno pod mostem [m n. m.] | dolní hrana mostovky [m n. m.] | horní hrana mostovky [m n. m.] |
|----------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 24,990 | silniční most (silnice 142) | 412,08 | 414,60 | 415,90 |
| 25,713 | most místní komunikace | 414,11 | 416,26 | 416,79 |
| 25,843 | lávka pro pěší | 414,82 | 417,23 | 417,78 |
| 26,247 | silniční most (Budějovická) | 416,41 | 418,58 | 419,68 |
| 26,378 | lávka pro pěší | 417,18 | 419,32 | 419,82 |
| 26,447 | most místní komunikace | 417,75 | 419,64 | 420,14 |

Betonový most místní komunikace na ř. km 26,447 s jedním středovým pilířem je možné vidět na obrázku níže (Obrázek 11). Šířka pilíře je 1,1 m. Pole mostu jsou široká 5,71 m, respektive 6,05 m. Levá břehová opěra přechází v opěrnou zeď.



Obrázek 11 – Most místní komunikace ř. km 26,447

Lávka pro pěší (ř. km 26,378) byla postavena z železobetonu. Lávka nemá břehové opěry, nic nenarušuje průtočný profil koryta. Šířka objektu je 10,73 m.

Dalším mostním objektem je silniční most (ř. km 26,247). Ten je zbudován na kamenných břehových opěrách, mostovka je z betonu. Most nemá žádné pilíře, otvor je široký 12,42 m. V nejvyšším místě dosahuje výška nade dnem 2,17 m.



Obrázek 12 – Silniční most ř.km 26,247

Lávka pro pěší (ř. km 25,843) stojí na kamenných pilířích, které vstupují do průtočného profilu. Šířka mezi pilíři je 8,93 m. U bočních pilířů může docházet k místním ztrátám, a to náhlým zúžením průtočného profilu.

Následuje most místní komunikace na ř.km 25,713. Ten je z železobetonu, opět na kamenných pilířích. Vzdálenost mezi břehovými opěrami je 9,13 metru a výškou (v nejnižším místě dna) 2,13 m.

Poslední mostní objekt je silniční most (ř. km 24,990), který je ze všech popisovaných objektů největší. Most tvoří 3 pole, prostředním z nich protéká Bezdrevský potok (šířka 16,7 m), v pravém (16,48 m) potok Třebánka (pohled proti proudu). Poslední pole se šířkou 16,45 m, není za normálních vodních stavů zapojeno. Středové pilíře jsou široké 2,75 a 3,85 m.



Obrázek 13 – Silniční most ř.km 24,990

3.2.2 Stupně ve dně

Následující tabulka (Tabulka 4) obsahuje stupně ve dně. Kromě staničení jsou uvedeny výšky přelivné hrany a dna obou objektů. Oba stupně jsou provedeny z kamene, koryto je opevněno před i za objekty. Okolí obou objektů je upraveno velmi podobně.

Tabulka 4 – Stupně ve dně v řešeném úseku

| Staničení [ř. km] | Objekt | dno pod stupněm [m n. m.] | horní hrana stupně [m n. m.] |
|----------------------|---------------|------------------------------|---------------------------------|
| 25.758 | stupeň ve dně | 413.91 | 414.92 |
| 26.358 | stupeň ve dně | 416.25 | 417.35 |

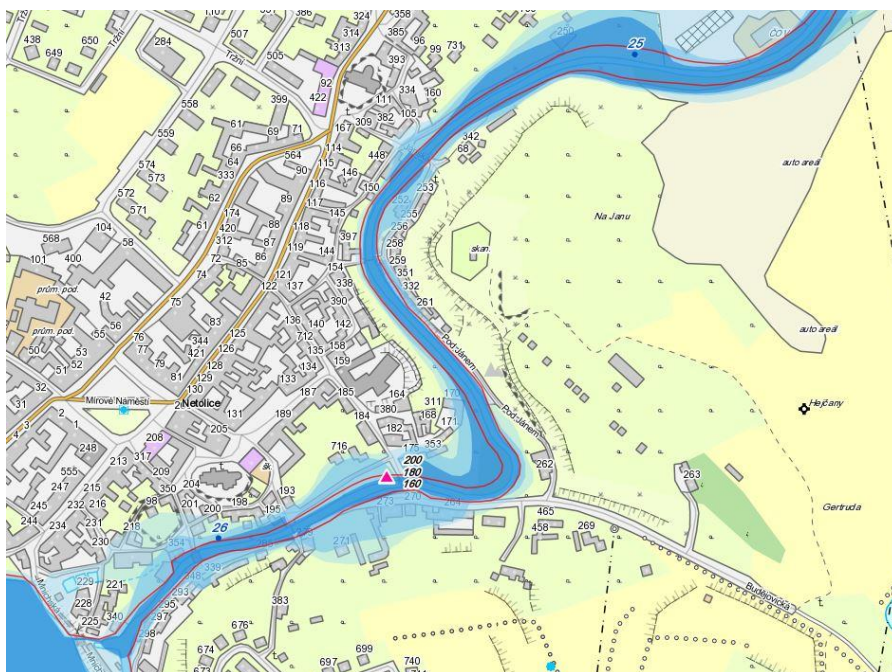
3.3 Záplavové území města Netolice

Záplavové území toku Bezdrevského potoka bylo zpracováno v roce 2011 projekčním oddělením Povodí Vltavy, státní podnik. Ke stanovení záplavového území byl použit software HEC-RAS. Výpočet byl proveden v 1D matematickém modelu zájmového území.

Záplavové území je vymezeno záplavovou čarou, což je křivka odpovídající průsečnici hladiny vody se zemským povrchem při zaplavení území povodní. [9]

Aktivní zóna záplavového území se stanovuje podle nebezpečnosti povodňového průtoku na základě zpracování map povodňového ohrožení. Povodňovým ohrožením se přitom rozumí vyhodnocení intenzity povodně na základě hydraulického výpočtu definované hloubkou a rychlostí proudění vody při povodních s různou dobou opakování. Aktivní zónou záplavového území rozumíme oblast, jež při povodni odvádí rozhodující část celkového průtoku, a tak bezprostředně ohrožuje život, zdraví a majetek lidí. [10]

Na obrázku (Obrázek 14) jsou znázorněna záplavová území pro povodňové průtoky Q_5 , Q_{20} a Q_{100} . Průtoky jsou znázorněny odstupňovanou modrou barvou, nejtmavší pro průtok Q_5 a nejsvětlejší pro průtok Q_{100} . Aktivní zónu záplavového území vymezují červené křivky. Aktivní zóna se stanovuje pro průtok stoleté povodně. Růžový trojúhelníček ukazuje místo hlásného profilu. K největšímu rozlivu dochází na severovýchodě města, a to již při průtoku Q_5 .



Obrázek 14 – Výřez záplavového území z map povodňového plánu [11]

V roce 2016 si nechalo Povodí Vltavy, státní podnik zpracovat dokumentaci oblastí s významným povodňovým rizikem pro dílčí část povodí Horní Vltavy. Součástí dokumentace je i Bezdrevský potok, a to v úseku vymezeném ř. km 25,000-28,000.

Vyhodnocení probíhalo v oblasti záplavového území, s použitím Registru sčítacích obvodů pro detailní počet trvale bydlících obyvatel. Dále byla použita databáze ZABAGED k výměrám a vymezení zastavěných ploch dle druhu využití. Z hlediska pravděpodobnosti výskytu jednotlivých povodní, je možné rozdělit povodně v dané oblasti na tři skupiny. Povodně s vysokou pravděpodobností výskytu (Q_5 a Q_{20}), se střední pravděpodobností výskytu (Q_{100}) a malou pravděpodobností výskytu nebo extrémní povodňové scénáře (Q_{500}). [12]

V tabulce níže (Tabulka 5) je možné vidět dotčení zastavěných a zastavitelných ploch scénáři povodňových událostí.

Tabulka 5 – Území obce Netolice dotčené rozlivem [12]

| Název obce | Zastavěné a zastavitelné plochy dotčené rozlivem (m ²) | | | | Celková plocha správního obvodu obce (m ²) |
|------------|--|-----------------|------------------|------------------|--|
| | Q ₅ | Q ₂₀ | Q ₁₀₀ | Q ₅₀₀ | |
| Netolice | 26 844 | 92 650 | 122 587 | 137 682 | 26 347 110 |

Druhá tabulka (Tabulka 6) ukazuje počet obyvatel i objektů zasažených danou povodňovou událostí. Největší nárůst zasažení objektů, respektive obyvatel je mezi pětiletou a dvacetiletou povodní.

Tabulka 6 – Obyvatelé a objekty dotčené povodňovým průtokem [12]

| Název obce | Počet obyvatel | Počet objektů celkem | Počet dotčených obyvatel a objektů | | | | | | | |
|------------|----------------|----------------------|------------------------------------|------|-----------------|------|------------------|------|------------------|------|
| | | | Q ₅ | | Q ₂₀ | | Q ₁₀₀ | | Q ₅₀₀ | |
| | | | Obyv. | Obj. | Obyv. | Obj. | Obyv. | Obj. | Obyv. | Obj. |
| Netolice | 2604 | 860 | 4 | 2 | 85 | 40 | 134 | 61 | 189 | 85 |

4. POVODŇOVÉ UDÁLOSTI

V této kapitole jsou zmíněny povodně na toku Bezdrevského potoka i další významné povodně na území nejen jižních Čech. Větší pozornost je věnována povodním z nedávné minulosti, a to z důvodu dostupnosti informací a jejich relevantnosti. Nicméně jsou obsaženy i starší historické povodně, vzhledem k nalezeným a dostupným podkladům.

4.1 Historické povodně

Nejstarší věrohodná zpráva o povodních z jižních Čech je ze 16. století. V městě Netolice je to poté povodeň z roku 1663. Povodeň tehdy protrhla hráze několika rybníků. Na paměť této velké vody byla umístěna deska do štítu budovy Ziegrosserova mlýna. Další velké povodně se vyskytly koncem 19. století a začátkem 20. století. Celá střední Evropa byla postižena výskytem větších povodní. Jmenovitě to byly roky 1880, 1897 i 1903. Přímo jih Čech byl sužován ještě s větší intenzitou. Významná byla povodeň na Vltavě v roce 1888 a poté každé dva roky docházelo k velkým nebo větším záplavám. Šlo o roky: 1890, 1892, 1894 a 1896. [13]

Nejničivější povodní ve zmíněném období se stala povodeň z počátku září 1890. Povodeň zasáhla povodí Vltavy a Labe, byla způsobena opakovanými vydatnými srážkami. Celé léto roku 1890 bylo mimořádně vlhké, svou roli tedy mohlo sehrát i nasycení půdy. Přírodní neštěstí si vyžádalo bohužel i několik desítek lidských životů. V Praze došlo k protržení několika polí Karlova mostu. [14]

Ve 20. století se velké povodně téměř nevyskytovali. Mezi největší na území jižních Čech lze zmínit povodeň z července roku 1954. Dokončovaná nádrž Slapy zadržela velkou část povodňové vlny. V roce 1970 postihla katastrofická povodeň jižní Moravu. [13]

4.2 Povodně 20. a 21. století

Na přelomu 20. a 21. století se po delší odmlce opět vyskytly katastrofické povodně. V červenci roku 1997 zasáhly extrémní srážky sever Moravy a Slezska. Povodeň proběhla Moravou, Slezskem a východními Čechy. Vyžádala si 50 životů. Úhrny srážek i objemy povodňových vln byly obrovské. [15]

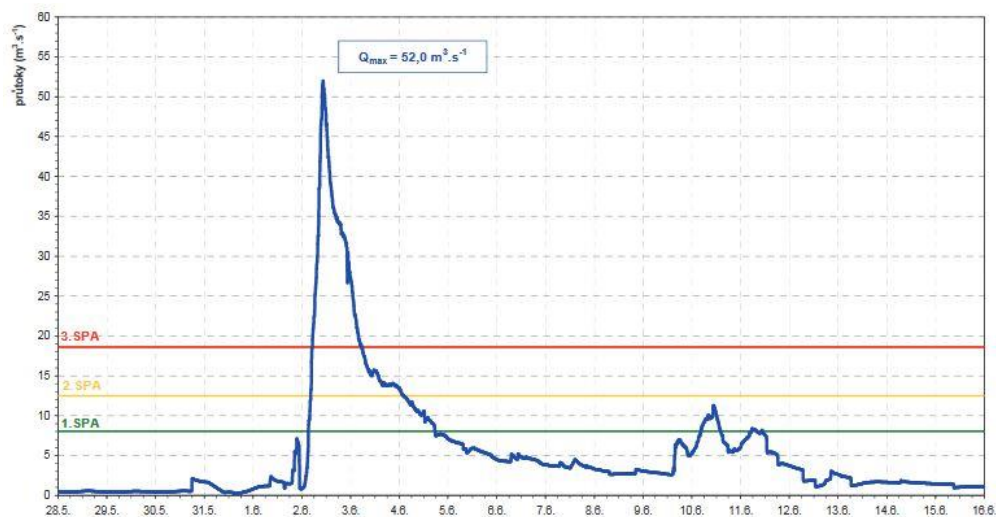
Začátkem srpna roku 2002 zasáhly ničivé povodně nejen Čechy, ale i celou střední Evropu. Souhrnná zpráva o povodni v srpnu 2002 za Povodí Vltavy uvádí následující příčiny vzniku povodní: „Byly způsobeny postupem dvou výrazných tlakových níží a s nimi spojených frontálních systémů přes střední Evropu v krátkém časovém odstupu za sebou. Obě tlakové níže zasáhly území České republiky svým nejdeštivějším sektorem. Obě navíc postupovaly jen zvolna, čímž se období trvalých srážek na našem území prodloužilo.” Vlny srážek zasáhly území ve dnech 6.8. – 7.8. a 11.8. – 13.8. 2002. První vlna zasáhla zejména jižní Čechy, maximální úhrny v Novohradských horách dosáhly za oba dny 278 mm. V druhé vlně bylo zasaženo širší území, nicméně maximální úhrny v součtu přesáhly první vlnu. Nejvíce srážek napadlo v Krušných horách, a to 380 mm. [15] [16]

Povodeň napáchala velké škody na celém území České republiky i v sousedních zemích. Město Netolice zasáhly obě povodňové vlny. V noci ze 7. na 8. srpna 2002 byl vyhlášen druhý stupeň povodňové aktivity (dále SPA). Třetí stupeň SPA nakonec byl vyhlášen 12.8., kdy zasáhla město druhá povodňová vlna. Během povodně hrozilo protržení hráze Hrbovského rybníka, to se však naštěstí nestalo. Škody způsobené povodněmi ve městě byly vyčísleny na 13 mil. Kč. Poškozena byla i MVE na rybníku Mnich. Na pravém břehu Bezdrevského potoka, přibližně 25 metrů od silničního mostu je na budově povodňová značka s výškou 419,32 m n. m. [17]

Další povodeň přišla v roce 2006. Její průběh nebyl tak dramatický, jako výše popsané povodně. Nicméně po této povodni bylo navrženo doplnění limnigrafických stanic v povodí Vltavy. Celkem se navrhlo 63 profilů na tocích v Jihočeském, Plzeňském, Středočeském i Karlovarském kraji a kraji Vysočina. Navržen byl mimo jiné i profil na Bezdrevském potoce, a to již zmíněný hlásný profil č.95a. [18]

Poslední velkou povodní na Bezdrevském potoce byla povodeň z roku 2013. Příčinou byly opět vydatné srážky. Ve dnech od 29.5. do 5.6. napršelo na území Čech v plošném průměru přes 100 mm srážek. Přiložené obrázky znázorňují průběh povodně z hlásného profilu. Obrázek 15 znázorňuje vývoj průtoku v čase. Je patrné, že příchod povodňové vlny byl extrémně rychlý, v řádu několika hodin. Kulminační

průtok dosáhl 52 m³/s, se stavem 291 cm. Stav odpovídá výšce 418,75 m n. m.
Hydrologicky odpovídá průtok hodnotám Q₁₀ – Q₂₀. [19]



Obrázek 15 – Bezdrevský potok, LG Netolice, červen 2013 [19]

5. HYDRAULIKA OTEVŘENÝCH KORYT

Cílem této kapitoly je přiblížit a vysvětlit základní pojmy a veličiny hydrauliky otevřených koryt, protože v této studii je s těmito pojmy dále nakládáno. Některé popsané hydraulické jevy jsou důležité pro samotné matematické modelování, které je také blíže popsáno v této kapitole. Důležité je uvést, že poměry při pohybu vody v otevřených korytech jsou složité a jejich matematická formulace není jednoduchá.

5.1 Základní pojmy

Na začátku je důležité definovat a zmínit některé základní termíny, se kterými budeme dále pracovat. Pro základy hydrauliky otevřených koryt a popsání samotného proudění to jsou pojmy: průtočný profil, bodová rychlost a průtok.

Průtočným profilem myslíme rovinný řez, kolmý k podélné ose koryta (resp. profilu). Část příčného průřezu, kterým voda protéká, označujeme jako průtočný profil. Průtočný profil může být uzavřený (např. potrubí či propustek) nebo otevřený (řeka). Tvar průtočného profilu se zvláště na přírodních (tedy neupravených) vodních tocích může velmi lišit, tím pádem ovlivňovat proudění. Mezi další zjišťované charakteristiky průtočného profilu patří: plocha průtočného profilu, šířka průtočného profilu (mění se při různých vodních stavech), omočený obvod, hydraulický poloměr a drsnost dna i břehů. Pro přehlednost jsou charakteristiky uvedeny v tabulce (Tabulka 7). [20]

Tabulka 7 – Charakteristiky průtočného profilu

| Označení charakteristiky | Popis charakteristiky | Jednotky |
|-----------------------------|--|-------------------|
| B | Šířka průtočného profilu | [m] |
| S | Plocha průtočného profilu | [m ²] |
| O | Omočený obvod, délka omočené části profilu | [m] |
| R | Hydraulický poloměr, poměr plochy ku omočenému obvodu průtočného profilu | [m] |
| n | Manningův součinitel drsnosti | [-] |

Blíže se podíváme na stanovení součinitele drsnosti. Tento součinitel, často označovaný jako Manningův, je důležitý pro téměř každý výpočet otevřených koryt. Charakterizuje odpor dna i břehů na proudící vodu. Odpor koryta je možné stanovit za pomoci tabulek, přímým změřením, porovnáním s fotografiemi nebo pomocí empirických vzorců. Pro ukázkou je v tabulce (Tabulka 8) uvedeno rozmezí hodnot, kterých může součinitel drsnosti nabývat v otevřených korytech. [21]

Tabulka 8 – Tabulka hodnot součinitele drsnosti rovinných toků [21]

| Druh koryta | n min. | n stř. | n max. |
|---|--------|--------|--------|
| Čisté, přímé, zaplněný profil, bez peřejí a tůní | 0,025 | 0,030 | 0,033 |
| Totéž, ale s přítomností plevelu a kamenů | 0,030 | 0,035 | 0,040 |
| Zakřivená trasa, čisté koryto s tůněmi a peřejemi | 0,033 | 0,040 | 0,045 |

Dále definujeme bodovou rychlost. Tak nazýváme okamžitou rychlost kapaliny v daném bodě. Bodová rychlost je popsána vztahem 5.1. [20]

$$u = u(x, y, z, t) \quad (5.1)$$

Bodovou rychlostí určité částice rozumíme též dráhu l , kterou tato částice urazí za jednotku času t . [20]

$$u = \frac{dl}{dt} \quad (5.2)$$

Průtok je objem kapaliny, který proteče průtočným průřezem za jednotku času. Průtočný průřez (častěji průtočná plocha) je plošný obsah řezu proudu plochou kolmou v každém bodě k vektoru bodové rychlosti u . Průtok je možné vyjádřit vztahem 5.3. Základní jednotkou jsou $[m^3/s]$. [20]

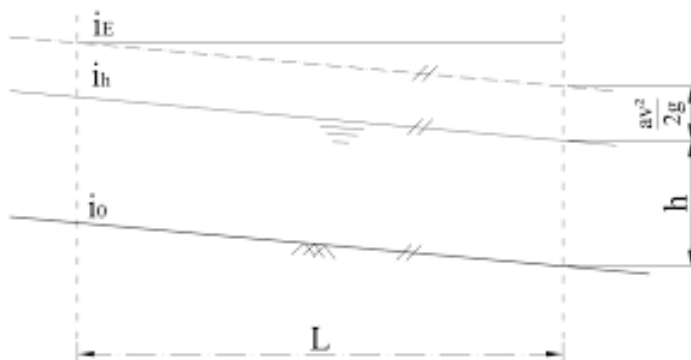
$$Q = \int_S u \cdot dS \quad (5.3)$$

5.2 Proudění v otevřeném korytě

Nejprve je nutné proudění samotné rozdělit na dva druhy. Proudění ustálené (stacionární) a neustálené (nestacionární). Rozdělení proudění na ustálené a neustálené je možné na základě časové závislosti veličin vody.

Ustálené proudění (stacionární) je takové proudění, ve kterém jsou hydraulické veličiny v čase konstantní. Mezi tyto veličiny řadíme: průtok (Q), průřezovou rychlost (u) a průtočnou plochu (S). Veličiny jsou závislé pouze na poloze. Tedy nejsou závislé na dráze ani čase. Ustálené proudění je možné dále rozdělit na rovnoměrné proudění a nerovnoměrné proudění. [20]

Ustálené rovnoměrné proudění může vzniknout pouze za předpokladu pravidelného tvaru průtočného profilu (koryto nemění tvar) a konstantního sklonu dna i_0 . Ukázka (Obrázek 16) zobrazuje průběh rovnoměrného proudění. Za zmínku stojí rovnoběžnost sklonu hladiny (i_h) se sklonem čáry energie (i_E) a sklonem dna (i_0). To je možné jen za výše definovaných podmínek. [20]



Obrázek 16 – Rovnoměrné proudění [20]

Aplikace výpočtů a rovnic ustáleného proudění není v praxi možná, neboť ustálené rovnoměrné proudění se v běžné přírodě téměř nevyskytuje. I pro následující kapitoly této studie je mnohem důležitější přiblížit ustálené nerovnoměrné proudění. Průtok je stále v čase konstantní. Po délce se mění hydraulické charakteristiky jako průtočná plocha, součinitel drsnosti, průřezová rychlost a další. [20]

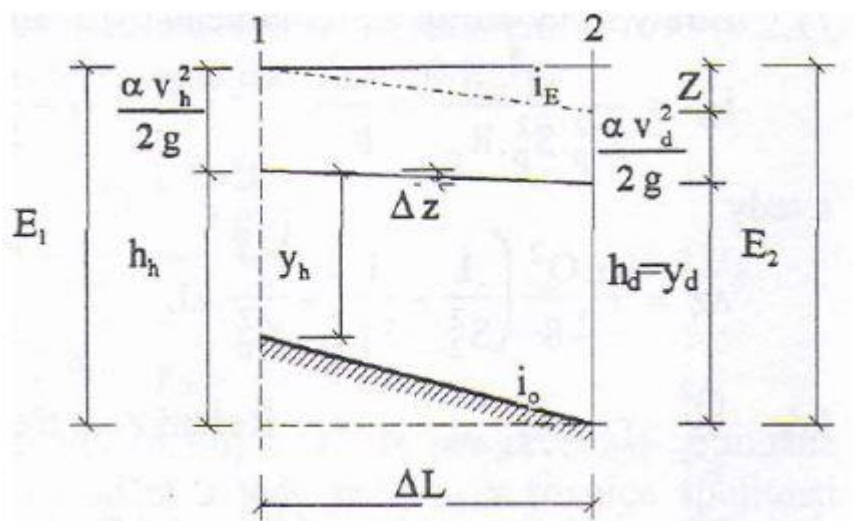
Průběh hladiny v přirozených vodních tocích se mění podle velikosti příčných profilů. Zjednodušeně je možné říci, že průběh hladiny je sledem křivek snížení a vzduť. Křivka snížení vzniká, když ve směru proudění hladina (hloubka) klesá.

Tato situace nastává například při výskytu stupně ve dně. Naopak křivka vzduť vzniká, pakliže ve směru proudění hloubka roste. Zpravidla se vyskytuje před objektem na toku (jez, mostní pilíře). [20] [22]

5.3 Řešení nerovnoměrného proudění

Ustálené nerovnoměrné proudění je možné řešit s využitím Bernoulliho rovnice. Tato metoda, která je dále více rozvedena, je též známá jako řešení po úsecích. Řešení je možné aplikovat na koryta prizmatická i neprizmatická. Prizmatické koryto je umělé přímé koryto, ve kterém jsou tvar průřezu, drsnost omočeného obvodu a sklon dna konstantní. Další řešení může být provedeno přímou integrací obecné diferenciální rovnice (např. Bachmatěv nebo Pavlovskij). Toto je možné pouze pro prizmatická koryta. Pro všechny druhy koryt platí podmínka, že je možné popsat proudění průměrným hydraulickým sklonem. Čára energie je konstantní. [22]

Řešení pomocí Bernoulliho rovnice u neprizmatických a přirozených koryt obecnou metodou po úsecích přibližuje obrázek dole (Obrázek 17).



Obrázek 17 – Schéma pro výpočet nerovnoměrného proudění [23]

Bernoulliho rovnici zavedeme mezi příčné profily 1 a 2, popsáno vztahem 5.4.

$$h_h + \frac{\alpha \cdot v_h^2}{2 \cdot g} = h_d + \frac{\alpha \cdot v_d^2}{2 \cdot g} + Z \quad (5.4)$$

kde h_h – výška nad srovnávací rovinnou v prvním profilu [m]

$v_h, (v_1)$ – průřezová rychlost v prvním profilu [m/s]

y_h – hloubka proudění v prvním profilu [m]

$v_d, (v_2)$ – průřezová rychlost v druhém profilu [m/s]

y_d – hloubka proudění v druhém profilu [m]

α – Coriolisovo číslo [-]

g – gravitační zrychlení [m/s²]

Z – ztrátová výška [m]

Rozdíl hladin v příčných profilech (Δz) je možné popsat následující rovnicí 5.5. Po dosazení obecné rovnice $Q = v \cdot S$, dostáváme vztah 5.6.

$$\Delta z = \frac{\alpha \cdot (v_2^2 - v_1^2)}{2 \cdot g} + Z \quad (5.5)$$

$$\Delta z = \frac{\alpha \cdot Q^2}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right) + Z \quad (5.6)$$

Do ztrátové výšky Z , započítáváme ztráty třením (Z_t) a ztráty místní (Z_m). Tyto ztráty jsou uvedeny dále ve vztazích 5.7, respektive 5.8.

$$Z_t = \frac{Q^2}{K_p^2} \cdot \Delta L \quad (5.7)$$

$$Z_m = \pm \xi \cdot \frac{\alpha \cdot (v_d^2 - v_h^2)}{2g} \quad (5.8)$$

Místní ztráty jsou zpravidla způsobeny změnou průřezu. Se znaménkem + počítáme v případech, kdy dochází ke křivce snížení. Ta nastává při bystřinném proudění po rozšíření průřezu, u říčního proudění po zúžení průtočného průřezu. Mínus zavádíme v opačných případech, tedy u křivky vzduť. V bystřinném proudění po zúžení průřezu, u říčního proudění po rozšíření. [21]

Dosazením vztahů ztrát (5.7 a 5.8) do rovnice 5.6, její následné úpravě a při opětovném zavedení $v = Q \cdot S$, dostáváme vztah pro výpočet rozdílů hladin v jednotlivých profilech (5.9).

$$Z_m = \pm \xi \cdot \frac{\alpha \cdot (v_d^2 - v_h^2)}{2g} \quad (5.9)$$

Pro samotný výpočet je ještě nezbytné vědět, jaké proudění se na daném úseku toku nachází. Směr výpočtu totiž není stejný pro říční a bystřinné proudění. Dle obrázku (Obrázek 17) postupuje výpočet v říčním proudění z profilu 2 do profilu 1 (proti proudu), v bystřinném proudění opačně (po proudu). Nutné je mít známý profil, ze kterého je možné výpočet začít. V obou případech se odhaduje změna hladiny (Δz) v dalším profilu a z výše popsaného postupu je vypočteno Δz . Pokud se odhadnuté a vypočtené Δz liší, upravuje se odhad. To se provádí do té doby, než se obě hodnoty rovnají. Pokračuje se dalším profilem. [21]

Tento postup výpočtu ustáleného nerovnoměrného proudění se využívá například pro výpočet v 1D matematickém modelování. Výhodou tohoto postupu je snazší příprava modelů výpočtu. Výpočet je zároveň velmi rychlý. Nevýhodou je, že zvláště za povodňových průtoků není splněn předpoklad vodorovné hladiny v příčném nebo údolním profilu. Zároveň není přesně znám průběh hladiny mezi jednotlivými profily. [24]

5.4 Výpočetní program HEC-RAS

Výpočetní program HEC–RAS byl vyvinut hydrologickým inženýrským centrem (Hydrologic Engineering Center), které je součástí US Army Corps of Engineers. Program prošel mnoha aktualizacemi a verzemi, první verze byla vydána již v roce 1995. Tato studie je zpracována ve verzi 5.0.6.

Program umožňuje výpočet jednorozměrného i dvojrozměrného ustáleného nebo neustáleného proudění v otevřených neprizmatických korytech v režimových oblastech říčních i bystřinných. Dále například transport sedimentu, analýzu teploty vody nebo simulaci kvality vody. [25]

Výpočet ustáleného nerovnoměrného proudění řeší obecná metoda po úsecích, blíže popsána v 5.3 Řešení nerovnoměrného proudění. Řídící rovnice programu pro výpočet dvojrozměrného proudění jsou popsány níže.

5.5 Výpočet 2D proudění a řídicí rovnice matematického modelu

Pro výpočet a modelování 2D proudění je nutné zmínit základní předpoklady, se kterými program HEC-RAS pracuje. Skutečný povrch terénu (koryta i inundačního území) je schematizován sítí výpočtových bodů s konečnými vzdálenostmi. Každý výpočtový bod je možné popsat souřadnicemi [X, Y, Z]. Výchozím předpokladem je zanedbání svislé složky rychlosti. Podmínka použití 2D modelu je, že vektory rychlosti musí mít po celé výšce každé svislice zanedbatelné odchylky ve směru. Model je možné použít v úsecích s prouděním relativně mělké vody. [24]

Základní rovnice, kterými lze popsat neustálené nerovnoměrné proudění v otevřených korytech, jsou rovnice spojitosti (popisující zákon zachování hmoty) a diferenciální Navier-Stokesovy pohybové rovnice. Ty vycházejí ze zákona zachování hybnosti. Rovnice jsou zjednodušeny předpoklady uvedenými výše. Po úpravách a zjednodušení je možné tyto rovnice zapsat jako pohybové rovnice. Rovnice 5.10 ve směru osy x, rovnicí 5.11 ve směru osy y. Tyto rovnice, spolu s rovnicí spojitosti (5.12), používá výpočetní program HEC-RAS jako rovnice řídicí. [24]

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \cdot \frac{q_x^2}{h} + \frac{1}{2} \cdot g \cdot h^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \cdot \frac{q_x \cdot q_y}{h} \right) + g \cdot h \cdot \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{h}{\rho} \cdot \frac{\partial p_a}{\partial x} - \alpha \cdot q_y + \quad (5.10)$$

$$\frac{1}{\rho} \cdot \left[\tau_{0x} - \tau_{px} - \frac{\partial(h \cdot \tau_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial(h \cdot \tau_{xy})}{\partial y} \right] = 0$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \cdot \frac{q_x^2}{h} + \frac{1}{2} \cdot g \cdot h^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \cdot \frac{q_x \cdot q_y}{h} \right) + g \cdot h \cdot \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{h}{\rho} \cdot \frac{\partial p_a}{\partial x} - \alpha \cdot q_y + \quad (5.11)$$

$$\frac{1}{\rho} \cdot \left[\tau_{0x} - \tau_{px} - \frac{\partial(h \cdot \tau_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial(h \cdot \tau_{xy})}{\partial y} \right] = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (5.12)$$

kde h – hloubka vody [m]

z – kóta dna [m]

ρ – hustota [kg/m³]

q_x – měrný průtok ve směru osy x [m²/s]

q_y – měrný průtok ve směru osy y [m²/s]

β – Boussinesqovo číslo [-]

p_a – atmosférický tlak (k vodní hladině) [Pa]

$\tau_{p,x}$, $\tau_{p,y}$ – smykové napětí na hladině, ve směru os x, y [Pa]

τ_{0x} , τ_{0y} – smykové napětí na dně, ve směru os x, y [Pa]

$\tau_{x,x}$, τ_{yy} , τ_{xy} , τ_{yx} – smykové napětí vlivem turbulence [Pa]

Celkem existují tři možnosti numerického řešení: metoda konečných diferencí, metoda konečných objemů a metoda konečných prvků. Pro všechny metody platí společný princip. Základní diferenciální rovnice jsou převedeny a zjednodušeny na rovnice lineární. Řešením těchto rovnic jsou získány hodnoty hledaných veličin. Model je rozdělen dle dané metody na prvky (elementy), které dohromady tvoří výpočetní síť. Mezi sebou jsou jednotlivé prvky spojeny uzly. [24]

Metody se liší tvarem výpočetní sítě, tím pádem i dobou trvání a stabilitou výpočtu. Z hlediska použití je metoda konečných diferencí vhodná pro výpočet v rozsáhlých záplavových územích. Metodu konečných prvků je možné využít pro výpočet proudění ve velmi složitých a komplikovaných záplavových územích nebo pro detailní modelování proudění objekty (mostní pilíře, nátoky do vodních elektráren atp.). [24]

6. TVORBA MATEMATICKÉHO MODELU

Tato kapitola je věnována vytvoření 2D matematického modelu a zpracování podkladů pro jednotlivé části modelu. Součástí kapitoly je popsání přípravy digitálního modelu terénu, průběh vytvoření výpočetní sítě, modelování objektů na toku, určení odporu povrchu v zájmovém území a zadání okrajových podmínek modelu.

6.1 Digitální model terénu a geodetické podklady

Základním prvkem pro vytvoření matematického modelu je digitální model terénu (dále DMT). DMT byl zpracován z bodů digitálního modelu reliéfu páté generace (DMR 5G) a z bodů geodetického zaměření koryta toku a přilehlého okolí. Pro zpracování bodů a tvorbu prostorových křivek byl použit software AutoCAD Civil 3D 2016. Generace DMT proběhla v programu Atlas DMT.

DMR 5G je produktem ČÚZK, vznikl mezi lety 2009 až 2013. Model vznikl z dat pořízených metodou leteckého laserového skenování území České republiky. Body modelu v digitální formě obsahují souřadnice $[X,Y,H]$, kde H reprezentuje nadmořskou výšku ve výškovém referenčním systému Balt po vyrovnání. [25]

Pro vytvoření DMT za účelem výpočtu proudění vody není možné použít pouze body z DMR 5G. Důvodem jsou chyby měření, které může zapříčinit například to, že měřící paprsek nepronikne vždy až k zemskému povrchu. To nastává v oblastech s hustou vegetací nebo zástavbou. Obdobně nepronikne paprsek skrze vodní hladinu. Odchyly měření laserového skenování od geodetického zaměření shrnuje Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace. Přesnost DMR 5G závisí na různém povrchu a půdním krytu. Průměrné hodnoty úplné střední chyby a maximální chyby jsou 0,14 m, respektive 0,49 m. Ověřovací zkoušky parametrů přesnosti modelu ukazují, že úplná střední chyba modelu v terénech pokrytých hustou vegetací dosahuje hodnoty 0,3 m. [26]

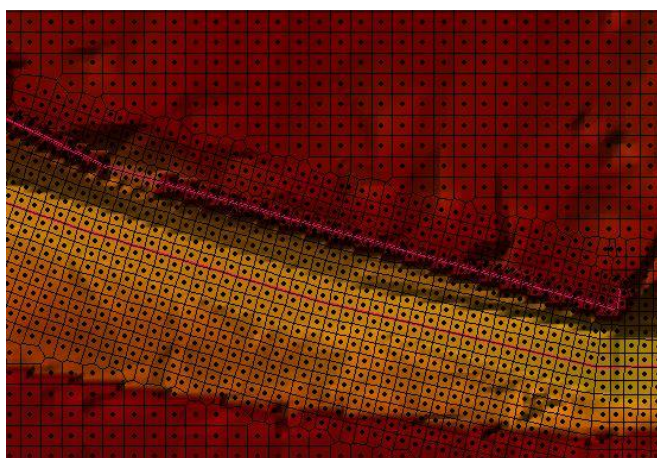
Z výše uvedených důvodů bylo použito geodetické zaměření koryta vodního toku a přilehlého okolí. Body z DMR 5G v blízkosti bodů geodetického zaměření byly ručně zkontrolovány a výškové odchylky byly upraveny na hodnoty zaměření.

Některé body byly z modelu vymazány úplně. Koryto, břehové hrany a jasné terénní lomové linie byly opatřeny prostorovou křivkou.

Součástí DMT jsou i stavební objekty, zejména budovy v inundačním území. Většina objektů byla zaměřena v půdorysu při zpracování technicko-provozní evidence vodního toku. Veškeré zástavbě byla při zpracování modelu přidělena výška 430 m n. m. Zeď u zahrady byla vymodelována s výškou 419,11 m n. m.

6.2 Tvorba výpočetní sítě

Vytvořený DMT byl nahrán do softwaru HEC–RAS. Nad vytvořeným terénem byla sestavena výpočetní síť. Jeden element výpočetní sítě má hranu o délce 1,5 m. V korytě toku a u jeho břehových hran je síť zhuštěna na 1 m. Stejně byla síť zhuštěna i u zdi na ř. km 26,232. Výpočetní síť je tvořena zpravidla čtyřúhelníky, v přechodech mezi hustší a jemnější částí se nacházejí mnohoúhelníky. Nicméně žádný z prvků sítě nesmí mít více než 8 hran. Příklad výpočetní sítě zobrazuje obrázek (Obrázek 18). Výpočetní síť celkem obsahuje přes 141 000 prvků.



Obrázek 18 – Ukázka výpočetní sítě

6.3 Modelování objektů

Objekty na toku, zmíněné v 3.2 Objekty, bylo také nutné zanést do modelu, aby mohl proběhnout přesný výpočet. Stupně ve dně byly vymodelovány v rámci přípravy DMT, za použití prostorové křivky. Vliv stupňů na průchod povodně není v této lokalitě významný.

Odlišně je tomu u mostních objektů. Do modelu byla zanesena přemostění, která mají na průběh povodně zásadní vliv. Z dostupných podkladů (1D výpočtu záplavového území) bylo uvažováno s předpokladem, že u některých mostů může již při průtoku Q_{20} docházet k tlakovému proudění.

Mosty byly vymodelovány jako propustky, na základě předpokladu tlakového proudění. Lávka pro pěší (tedy její břehové opěry) na ř. km 25,843 byla vymodelována v přípravě DMT. Lávka na ř. km 26,378 nemá břehové opěry, ani jinak neomezuje průtočný profil, proto není v modelu s tímto objektem uvažováno.

6.4 Odpor povrchu

K správnému výpočtu odtokových poměrů bylo nutné stanovit odpory povrchů v zájmovém území. Odpory byly stanoveny za použití Manningova součinitele drsnosti. Území bylo rozděleno za pomoci ortofotografií na polygony se stejným povrchem (silnice – zpevněné plochy, zástavba, louky, les a koryto) a každé ploše byla přidělena hodnota součinitele drsnosti. Jednotlivé hodnoty je možné vidět v tabulce (Tabulka 9). Hodnoty byly stanoveny odborným odhadem.

Tabulka 9 – Hodnoty Manningova drsnostního součinitele

| Povrch | n |
|---------------------------|----------|
| Silnice (zpevněné plochy) | 0,03 |
| Koryto | 0,035 |
| Louka (zatravněné plochy) | 0,04 |
| Zástavba | 0,12 |
| Les | 0,15 |

6.5 Okrajové podmínky

Důležitým prvkem pro výpočet jsou okrajové podmínky. Jejich definicí a umístěním určujeme, kde a kolik vody do modelu přitéká a odtéká. Horní okrajovou podmínku zpravidla definujeme hydrogramem. Jedná se o časový průběh průtoku. Dolní

okrajová podmínka může být definována například záporným hydrogramem, tedy hodnotami průtoků, které mají být z modelu odebrány. Nebo častěji normálovou hloubkou, zadanou přímou kótou hladiny. Případně zadaným sklonem, z něhož je hladina dopočtena.

Horní okrajová podmínka byla definována za pomoci hydrogramu. Umístěna je přímo u výtoku z rybníka Mnich. Po šestihodinových krocích byl průtok rovnoměrně zvětšován na hodnoty Q_5 , Q_{20} a Q_{100} z hlásného profilu. Dále byl u okrajové podmínky stanoven podélný sklon v místě zakreslení HOP do modelu. Sklon ovlivňuje distribuci zadaného průtoku do buněk v okolí okrajové podmínky. Zadaná hodnota je 0,008.

Dolní okrajová podmínka byla definována normálovou hloubkou, respektive podélným sklonem v místě zadané podmínky. Zadaná hodnota je 0,01.

7. VÝPOČET

Po vytvoření celého modelu a definování okrajových podmínek, je možné přejít k výpočtu. Tato kapitola představuje dva základní druhy výpočtu, které může uživatel softwaru využít, pro větší flexibilitu modelování. Jedná se o difuzní vlnu a kompletní pohybové rovnice. Dále popisuje vlastní výpočet provedený na vytvořeném modelu.

7.1 Difuzní vlna

Difuzní vlna je výpočetní metoda, kterou nabízí software HEC–RAS jako základní řešení pro 2D výpočet. Tato metoda umožňuje rychlejší průběh výpočtu, s větší stabilitou. Tato metoda je využitelná v modelových situacích, kde je průtok poháněn hlavně gravitací a třením. Dále tam, kde zrychlení kapaliny je nevýrazné a hladké (tedy nepočítáme s existencí vln). Použití je možné například pro stanovení záplavových území. [25]

7.2 Kompletní pohybové rovnice

Výpočetní metoda kompletních pohybových rovnic bývá často označována jako metoda Saint–Venantových rovnic. Pouze tato metoda může být použita k modelování dynamických povodňových vln (model protržení rybníka či přehrady). Dále je možné metodu využít pro výpočet přesných rychlostí a výšek hladin v okolí budov, konstrukcí nebo překážek na vodním toku. Dalším použitím může být i přesné modelování změny proudění. Například z bystřínného proudění do říčního (vodní skok). Ve všech těchto uvedených příkladech je nezbytné využít kompletní pohybové rovnice. [25]

Úskalím této metody jsou nároky na výpočetní techniku, navíc pohybové rovnice mohou být numericky nestabilní v místech výpočetní sítě, kde se rychle mění směr průtoku nebo kolísá vodní hladina. Těmto problémům je možné se vyhnout zhuštěním sítě a zmenšením výpočetního kroku (ve stejném modelu bude potřeba menší výpočetní krok téměř vždy). Tím se ale zvyšuje celková doba výpočtu. [25]

Obecný přístup je nejprve za použití difuzní vlny objevit a vyřešit všechny problémy, které se vyskytnou. Poté přejít k výpočtu za použití kompletních pohybových rovnic.

Pokud se při porovnání výsledků obě metody signifikantně liší, předpokládá se, že Saint – Venantova metoda je více přesná. [25]

7.3 Vlastní výpočet

Výpočet pro zájmovou lokalitu byl proveden nejprve za použití difuzní vlny. Během tohoto procesu došlo k odstranění problémů spojených s umístěním objektů a jejich napojením k výpočetní síti. Hustota sítě byla ponechána 1,5 m v inundačním území. Zhuštění prvků sítě na 1 m proběhlo v korytě toku a okolí zájmového objektu. Obecně je možné říci, že výběr hustoty výpočetní sítě (velikostí jednoho elementu sítě) a časového kroku výpočtu je balancováním mezi získáním dobré numerické přesnosti za minimalizování výpočetního času. [25]

Bylo tedy nutné najít spolehlivý výpočetní krok (Δt). Po vyzkoušení a několika pokusech byl výpočet proveden s časovým krokem 1 sekundy pro difuzní vlnu. Výpočet za použití kompletních pohybových rovnic proběhl s krokem 0,5 sekundy.

8. ANALÝZA VÝSLEDKŮ A POZNATKŮ

Pro účely této studie byly zhotoveny dva výpočetní modely. Liší se pouze v umístění zájmového objektu na ř. km 26,232. V této kapitole jsou shrnuty poznatky a výsledky matematických modelů. Došlo k porovnání obou výpočetních metod. Dále je popsán koncepční návrh protipovodňové ochrany.

8.1 Posouzení stávající míry protipovodňové ochrany

Pro posouzení stávající míry protipovodňové ochrany města Netolice byly využity mapy záplavového území a jednorozměrný výpočet záplavových území provedený v programu HEC-RAS. Na základě těchto podkladů je možné konstatovat, že město Netolice nepřevede bez problému ani průtok Q_2 ($20 \text{ m}^3/\text{s}$). Třetí stupeň povodňové aktivity, stav ohrožení, je vyhlášen při průtoku $19,5 \text{ m}^3/\text{s}$. K největšímu rozlivu dochází na severovýchodě obce před soutokem s vodním tokem Třebánka. Území obce, stavební objekty i obyvatelé dotčení rozlivem jsou přehledně uvedeny v tabulkách (Tabulka 5 a 6).

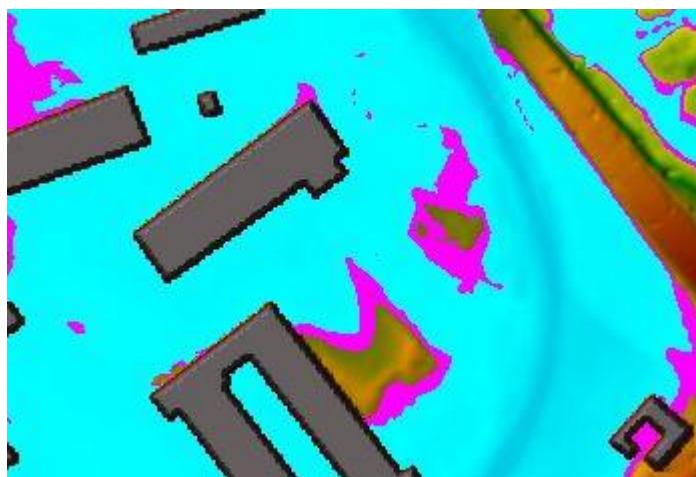
Součástí dokumentace oblastí s významným povodňovým rizikem je seznam vhodných nestavebních opatření na toku Bezdrevského potoka. Zmíněna jsou opatření prevence i připravenosti. Mezi navrhovaná opatření prevence patří: pořízení nebo změna územně plánovací dokumentace obcí, využití výstupů povodňového plánování jako limitu v územním rozhodování a snížení nepříznivých účinků na budovy i veřejnou infrastrukturu. Opatření pro zlepšení připravenosti jsou dvě. Zaprvé zlepšení hlásné, předpovědní a výstražné protipovodňové služby. Zadruhé vytvoření nebo aktualizace povodňových plánů územních celků a nemovitostí. [12]

8.2 Porovnání výsledků modelů

Nejprve došlo k porovnání výsledků obou výpočetních metod (difuzní vlny a kompletních pohybových rovnic) u každého modelu zvlášť. Srovnání výpočetních metod proběhlo na základě rozlivů a rychlostí. K porovnání hloubek byl použit výpočet z 1D výpočetního modelu. Zejména rychlosti u mostních objektů byly předmětem podrobnějšího zkoumání. Až poté byly porovnány oba modely mezi sebou, aby mohlo dojít k posouzení zájmového objektu. K porovnání byla použita

funkce RAS Mapper. Výstupy z aplikace byly použity v softwaru QGIS, kde byly vytvořeny mapy rychlostí a hloubek.

Rozlivy pro obě výpočetní metody jsou velmi podobné. Největší rozdíl je možné pozorovat při rozlivu na severovýchodě obce (Obrázek 19). Fialově je znázorněna metoda kompletních pohybových rovnic, modře difuzní vlny. U metody kompletních pohybových rovnic je rozliv větší v průměru o 0,5-5 m. K větším rozdílům vodorovné odchylky záplavových území (maximum 7 m) dochází při povodňovém průtoku Q_{100} .



Obrázek 19 – Porovnání výsledků výpočetních metod

Úměrně s plochou rozlivů se mění hloubka. V tomto případě srovnání proběhlo s výsledky 1D modelu, v profilu na začátku zájmového úseku (ř. km 26,511). Výstupy a jejich srovnání dokumentuje tabulka (Tabulka 10). Ze srovnání je patrné, že úroveň hladiny vycházejí větší z výpočtu 2D modelu. Geodeticky zaměřené příčné profily, které byly použity pro výpočet 1D modelu, jsou součástí DMT ve výpočtu 2D proudění. To má za následek velkou podobnost výšky hladin.

Tabulka 10 – Srovnání výpočtu 1D a 2D matematického modelu na ř. km 26,511

| N-leté průtoky | 1D–výška hladiny [m n. m.] | 2D–výška hladiny [m n. m.] |
|----------------|----------------------------|----------------------------|
| Q_5 | 419,80 | 419,84 |
| Q_{20} | 420,35 | 420,41 |
| Q_{100} | 420,93 | 420,98 |

Při detailním prohlížení výsledků rychlostí byly nalezeny značné rozdíly ve výsledcích výpočetních metod. Zejména na vtoku a výtoku mostních objektů se výsledné rychlosti výrazně liší, maximálně o 1,5 m/s. K těmto odlišnostem dochází u objektů, kde je omezen průtočný profil (např. břehovými opěrami). K srovnání byl vybrán silniční most na ř.km 26,247. Porovnání proběhlo pro průtoky Q_5 a Q_{100} .

Tabulka 11 – Srovnání rychlostí na vtoku a výtoku silničního mostu ř. km 26,247

| N-leté průtoky | Difuzní vlna rychlost na vtoku [m/s] | Pohybové rce. rychlost na vtoku [m/s] | Difuzní vlna rychlost na výtoku [m/s] | Pohybové rce. rychlost na výtoku [m/s] |
|-------------------|--|---|---|--|
| Q_5 | 1,476 | 1,327 | 1,988 | 1,642 |
| Q_{100} | 1,842 | 1,653 | 3,082 | 2,406 |

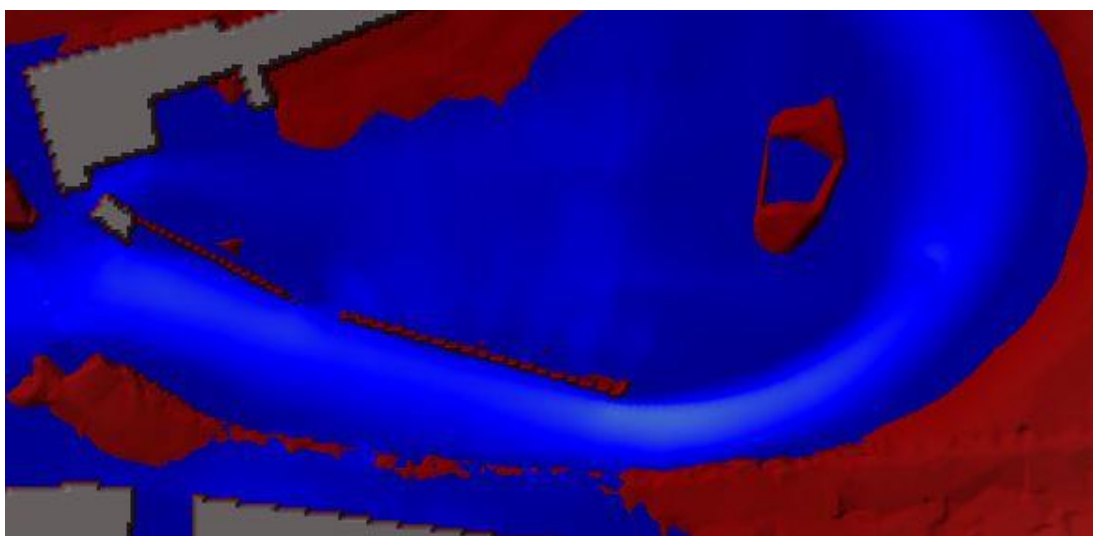
Na základě výše uvedeného srovnání výpočetních metod, se jeví přesnější výsledky z výpočtu kompletních pohybových rovnic. Tyto výsledky byly použity k posouzení zájmového objektu a ke koncepčnímu návrhu protipovodňové ochrany.

8.3 Posouzení zájmového objektu

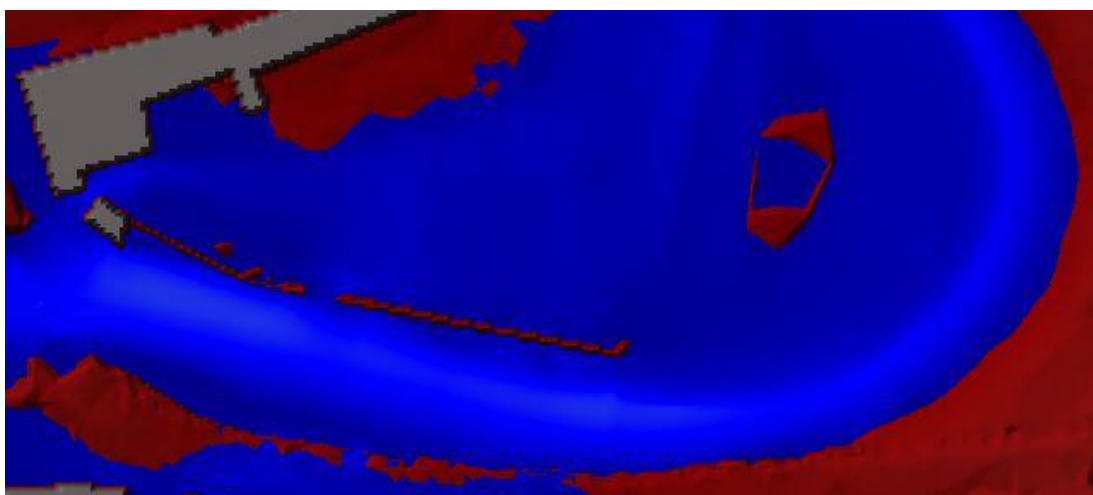
Plán úpravy na ř. km 26,232 je posunutí zájmového objektu (zdi) a zkapacitnění průtočného profilu v tomto místě. Ze srovnání výsledků modelů vyplývá, že tato úprava nemá významný pozitivní vliv na průchody povodňových průtoků. Srovnání proběhlo v aplikaci RAS Mapper.

Na obrázcích (Obrázek 20, Obrázek 21) jsou zobrazeny rychlosti za povodňového průtoku Q_{20} . Při tomto průtoku je patrný pozitivní vliv úpravy na průběh rychlostí. Obrázek 20 dokumentuje stávající stav. Za zdí dochází k náhlé změně směru proudu v korytě. Proud dosahuje maximální rychlosti 2,7 m/s. Obrázek 21 ukazuje vliv úpravy, maximální rychlost je snížena na hodnotu 2,2 m/s.

Z hlediska rozlivů nebo průběhu hladin nedochází k pozitivnímu efektu. Povodňové průtoky Q_{20} a Q_{100} ($56 \text{ m}^3/\text{s}$, resp. $95 \text{ m}^3/\text{s}$) jsou příliš velké, že dílčí úprava nemůže sama zajistit požadovanou míru protipovodňové ochrany.



Obrázek 20 – Zájmový objekt-stávající stav, průtok Q_{20}



Obrázek 21 – Zájmový objekt-plánovaná úprava, průtok Q_{20}

8.4 Koncepční návrh zvýšení protipovodňové ochrany

Na základě výše uvedených výpočtů a posouzení zájmového objektu je zpracován koncepční návrh protipovodňové ochrany pro průtok Q_5 ($32 \text{ m}^3/\text{s}$). Všechna vhodná nestavební opatření zvýšení protipovodňové ochrany byla zmíněna v oddíle 8.1. Zde jsou popsána technická stavební opatření na březích vodního toku, která zajistí převedení povodně Q_5 . Všechna stavební opatření jsou přehledně uvedena v tabulce (Tabulka 12). Stavební opatření byla navržena 15 cm nad hladinou Q_5 .

Opatření jsou navrhnutá v místech, kde při rozlivu dochází nebo může dojít k ohrožení stavebních objektů. Neškodný je rozliv na levém břehu od ř.km 26,185 po ř.km 26,050. Na pravém břehu od ř. km 25,673 po 25,319.

Tabulka 12 – Navržená stavební opatření

| Umístění úpravy | Staničení [ř. km] | Typ úpravy | Výška začátku úpravy [m n. m.] | Výška konce úpravy [m n. m.] |
|-----------------|-------------------|---------------|--------------------------------|------------------------------|
| LB | 26,505 - 26,486 | úprava terénu | 420,04 | 420,04 |
| PB | 26,500 - 26,367 | úprava terénu | 420,13 | 419,08 |
| LB | 26,461 - 26,367 | úprava terénu | 419,62 | 419,00 |
| PB | 26,325 - 26,259 | úprava terénu | 418,57 | 418,47 |
| LB | 26,071 - 25,850 | zídka | 417,70 | 416,96 |
| LB | 25,753 - 25,716 | úprava terénu | 416,43 | 416,32 |
| LB | 25,565 - 25,069 | zídka | 415,39 | 414,75 |
| LB | 25,069 - 25,028 | úprava terénu | 414,75 | 414,68 |
| PB | 25,319 - 25,233 | úprava terénu | 414,47 | 414,95 |
| PB | 25,233 - 25,102 | zídka | 414,95 | 414,79 |

Většina navržených stavebních opatření je malého charakteru. Všechna opatření jsou navržena na březích vodního toku, bez nutnosti složitě zasahovat přímo do koryta. Mezi větší opatření patří zídka na pravém břehu (ř. km 25,233-25,102) a zídky na levém břehu (ř. km 26,131-25,850; 25,565-25,069). Ty jsou navrženy jako součást úpravy terénu. Vyvýšením terénu a následným vybudováním zídky je zajištěn bezpečný průchod povodně. Přehledně jsou úpravy vykresleny v Příloze A2 – Podélný profil.

9. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo posouzení odtokových poměrů Bezdrevského potoka v Netolicích. Na základě výpočtů 2D matematických modelů proběhlo posouzení stávající míry protipovodňové ochrany. Bezpečně je skrz město převeden průtok Q_1 . Stávající míra ochrany je, dle provedených výpočtů, nedostatečná. Proto bylo zpracováno koncepční řešení protipovodňové ochrany na průtok Q_5 ($32 \text{ m}^3/\text{s}$).

Ke zpracování studie byl použit software HEC-RAS, ve verzi 5.0.6. Výpočet obou modelů proběhl za použití difuzní vlny i kompletních pohybových rovnic. Obě výpočetní metody byly porovnány, a dále pro zpracování studie i návrh koncepčního řešení byly použity přesnější výsledky z výpočtu kompletních pohybových rovnic.

Zájmový objekt na ř. km 26,232 byl posouzen v kapitole 8. Zamýšlená úprava nemá žádný velký pozitivní dopad na průchod povodňových průtoků. Popsané snížení rychlostí v dílčím úseku vodního toku není dostačující z hlediska ochrany před povodněmi.

Ve studii není uvažováno s možným ovlivněním průběhu povodně vodním tokem Třebánka. Za předpokladu povodní způsobených zvýšeným srážkovým úhrnem je možné předjímat, že tento potok bude ovlivňovat průběhy hladin, především na severovýchodě obce. Kritickým místem se jeví silniční most na ř. km 24,990, kde dochází k soutoku obou potoků. Stejně tak není ověřeno výpočtem, že navržené koncepční řešení nezhorší povodňovou situaci dále po toku. Vzhledem k možnostem rozlivu (louky, pole) za zájmovým úsekem studie je však tato skutečnost málo pravděpodobná.

Součástí koncepčního řešení protipovodňové ochrany jsou výkresy uvedené v příloze této práce. Jedná se o výkresy situace, podélného profilu a vzorových příčných řezů. Dále jsou v příloze uvedeny mapy rychlostí a hloubek pro průtoky Q_5 a Q_{100} .

10. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV, Úsek hydrologie, oddělení povrchových vod [online]. Praha: ČHMÚ, 2019 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <http://voda.chmi.cz/opv/>
- [2] Podnebí Česka. Wikipedia [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Podnebí_Česka
- [3] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV, [online]. Praha: ČHMÚ, 2019 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mapy-charakteristik-klimatu#>
- [4] Podnebí Netolice [online]. 2019 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: https://www.meteoblue.com/cs/po%C4%8Das%C3%AD/p%C5%99edpov%C4%9B%C4%8F/modelclimate/netolice_%c4%8cesko_3069808
- [5] BALOUN, Jiří a Petr HOVORKA. Modernizace měrných profilů hlásné povodňové služby oblasti povodí Horní Vltavy. Vodohospodářský Bulletin [online]. 2008, [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <http://www.csvh.cz/bulletin/2008obsah.pdf>
- [6] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV: Hlásná a předpovědní povodňová služba [online]. 2019 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: http://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfbk_detail.php?seq=20067827
- [7] Geovědní mapy, Česká Geologická Služba [online]. [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geocr50/>
- [8] Půdní mapy [online]. [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/pudni_mapy
- [9] Ministerstvo vnitra ČR, Mimořádné události, Pojmy [online]. [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <https://www.mvcr.cz/clanek/zaplavova-cara.aspx>
- [10] Ministerstvo životního prostředí, Záplová území [online]. 2018 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/zaplavova_uzemi
- [11] Mapa povodňového plánu, záplavová území [online]. [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: https://www.edpp.cz/orppt_mapa-povodnoveho-planu-orp/

- [12] Dokumentace oblastí s významným povodňovým rizikem, Bezdrevský potok [online]. [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: http://www.pvl.cz/portal/pdp/VH/DOsVPR/1_Text/HVL_Netolice.pdf
- [13] MUNZAR, Jan a Stanislav ONDRÁČEK. Velké historické povodně v jižních Čechách a jejich impakty [online]. In: . 2007 [cit. 2019-04-02]. ISBN 978-80-7040-986-2. Dostupné z: <http://invenio.nusl.cz/record/37565>
- [14] MUNZAR, Jan a Stanislav ONDRÁČEK. Historické povodně a jejich dokumentace. Geografické rozhledy. 2012, 21(5), 30-32. ISSN 1210-3004.
- [15] HAVLÍK, Aleš. Povodně na území Česka [online]. [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Vin/ke_stazeni/Povodne.pdf
- [16] Souhrnná zpráva o povodni v srpnu 2002 za Povodí Vltavy, státní podnik.: Vodohospodářský dispečink Povodí Vltavy, s.p. v Praze [online]. 2003 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: http://www.dibavod.cz/data/povodnove_zpravy/vltava/vltava_08_2002.pdf
- [17] Zápis ZM č. 4 ze dne 11.9.2002 [online]. 2006 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <http://www.netolice.cz/zapis-zm-c-4-ze-dne-11-9-2002/d-1062>
- [18] Souhrnná o povodni v oblastech povodí Horní Vltavy, Berounky a Dolní Vltavy, srpen 2006 [online]. 2006 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: http://www.dibavod.cz/data/povodnove_zpravy/vltava/vltava_08_2006.pdf
- [19] Souhrnná zpráva o povodni v dílčích povodích Horní Vltavy, Berounky, Dolní Vltavy a ostatních přítoků Dunaje, povodeň červen 2013 [online]. 2014 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://www.pvl.cz/files/download/hydrologicke-informace/zpravy-o-povodni/2013-06-zprava-o-povodni-spravce-povodi.pdf>
- [20] JANDORA, Jan, Jan ŠULC a Vysoké učení technické v Brně. Stavební fakulta. Hydraulika: modul 01. [cit. 2019-04-15]. Vyd 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 8072045121;9788072045129
- [21] HAVLÍK Aleš, PICEK Tomáš, Hydraulika otevřených koryt [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_05_Ustalene_proudeni_v_korytech.pdf

- [22] K141 HYA, Hydraulika otevřených koryt [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/Hya/ke_s_tazeni/prednasky/07_hydraulika_otevrenych_koryt.pdf
- [23] K141 HYA, PVH1 - Výpočet kapacity koryta [online]. [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Toky/Predmety/PVH1/PROJEKT/ke_stazeni/cviceni/Cviceni_02.pdf
- [24] HAVLÍK Aleš, Matematické modelování proudění vody s volnou hladinou [online]. [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/1837043-Matematicke-modelovani-proudeni-vody-s-volnou-hladinou.html>
- [25] HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%202D%20Modeling%20Users%20Manual.pdf>
- [26] Český úřad zeměměřický a katastrální, Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(dvsguxllmh3hxbu5rpe3rzy\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302](https://geoportal.cuzk.cz/(S(dvsguxllmh3hxbu5rpe3rzy))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZZK-DMR5G-V&head_tab=sekce-02-gp&menu=302)
- [27] Český úřad zeměměřický a katastrální, Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G) [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: https://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_5G.pdf

11. SEZNAM PŘÍLOH

A Výkresy:

A1 – Celková situace

A2 – Podélný profil

A3 – Vzorové příčné řezy

B Mapové výkresy:

B1 – Mapa hloubek vody pro Q_5

B2 – Mapa svislicových rychlostí pro Q_5

B3 – Mapa hloubek vody pro Q_{100}

B4 – Mapa svislicových rychlostí pro Q_{100}

12. SEZNAM VZTAHŮ A ROVNIC

| | |
|--|--------|
| Bodová rychlost | (5.1) |
| Bodová rychlost (změna dráhy v čase) | (5.2) |
| Průtok | (5.3) |
| Bernoulliho rovnice | (5.4) |
| Rozdíl hladin v příčných profilech | (5.5) |
| Rozdíl hladin v příčných profilech (po úpravě) | (5.6) |
| Ztráty třením | (5.7) |
| Ztráty místní | (5.8) |
| Rozdíl hladiny v jednotlivých profilech | (5.9) |
| Pohybová rovnice ve směru osy x | (5.10) |
| Pohybová rovnice ve směru osy y | (5.11) |
| Rovnice spojitosti (zákon zachování hmoty) | (5.12) |

13. SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obrázek 1 - Trasa Bezdrevského potoka | 10 |
| Obrázek 2 – Přehledný podélný profil Bezdrevského potoka..... | 11 |
| Obrázek 3 – Mapa průměrného ročního úhrnu srážek 1981-2010 [2]..... | 12 |
| Obrázek 4 – Průměrné roční teploty a úhrn srážek v Netolicích [4]..... | 12 |
| Obrázek 5 – Větrná růžice pro Netolice [4] | 13 |
| Obrázek 6 – Geologická mapa Netolice [7]..... | 15 |
| Obrázek 7 – Vyznačený zájmový úsek v katastrální mapě..... | 16 |
| Obrázek 8 – Pohled na koryto směrem k rybníku Mnich | 17 |
| Obrázek 9 – Pohled proti proudu od silničního mostu..... | 17 |
| Obrázek 10 – Povodeň 2013 u zájmového objektu..... | 18 |
| Obrázek 11 – Most místní komunikace ř. km 26,447 | 20 |
| Obrázek 12 – Silniční most ř.km 26,247 | 20 |
| Obrázek 13 – Silniční most ř.km 24,990 | 21 |
| Obrázek 14 – Výřez záplavového území z map povodňové plánu [11] | 23 |
| Obrázek 15 – Bezdrevský potok, LG Netolice, červen 2013 [19]..... | 27 |
| Obrázek 16 – Rovnoměrné proudění [20]..... | 30 |
| Obrázek 17 – Schéma pro výpočet nerovnoměrného proudění [23]..... | 31 |
| Obrázek 18 – Ukázka výpočetní sítě..... | 37 |
| Obrázek 19 – Porovnání výsledků výpočetních metod..... | 43 |
| Obrázek 20 – Zájmový objekt-stávající stav, průtok Q_{20} | 45 |
| Obrázek 21 – Zájmový objekt-plánovaná úprava, průtok Q_{20} | 45 |

14. SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tabulka 1 – N-leté průtoky v hlásném profilu č.95a [4]..... | 14 |
| Tabulka 2 – N-leté průtoky ČHMÚ | 14 |
| Tabulka 3 – Seznam mostních objektů v řešeném úseku..... | 19 |
| Tabulka 4 – Stupně ve dně v řešeném úseku | 22 |
| Tabulka 5 – Území obce Netolice dotčené rozlivem [12]..... | 24 |
| Tabulka 6 – Obyvatelé a objekty dotčené povodňovým průtokem [12]..... | 24 |
| Tabulka 7 – Charakteristiky průtočného profilu | 28 |
| Tabulka 8 – Tabulka hodnot součinitele drsnosti rovinných toků [21] | 29 |
| Tabulka 9 – Hodnoty Manningova drsnostního součinitele | 38 |
| Tabulka 10 – Srovnání výpočtu 1D a 2D matematického modelu na ř. km 26,511 .. | 43 |
| Tabulka 11 – Srovnání rychlostí na vtoku a výtoku silničního mostu ř. km 26,247 . | 44 |
| Tabulka 12 – Navržená stavební opatření | 46 |