VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

MODELOVÁNÍ ZVLÁŠTNÍ POVODNĚ POD VODNÍM DÍLEM PLUMLOV

MODELING OF FLOOD PROPAGATION DUE TO THE FAILURE OF THE PLUMLOV DAM

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Karel Pekárek**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **doc. Ing. JAN JANDORA, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N0732A260025 Stavební inženýrství – vodní hospodářství a vodní stavby
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Specializace	bez specializace
Pracoviště	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Karel Pekárek
Název	Modelování zvláštní povodně pod vodním dílem Plumlov
Vedoucí práce	doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2021
Datum odevzdání	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Boor, B., Kunštátský, J., Patočka, C. Hydraulika pro vodohospodářské stavby. SNTL. Praha. 1968.
Chow, Ven Te. Open Channel Flow. Mc Graw Hill Book Company. 1959.
Čihák, F., Valenta, P., Vaněček, S., Zeman, E. Automatizace inženýrských úloh. ES ČVUT. Praha 1991.
http://www.hec.usace.army.mil
Kolář, V., Patočka, C., Bém, J. Hydraulika. SNTL/ALFA. Praha. 1983.
Říha, J. a kol. Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů. VUT v Brně. Brno. 1997.
Mapové podklady a hydrologická data.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Na vodním toku Hloučela pod vodním dílem Plumlov proveďte vymezení území ohroženého zvláštní povodní pomocí matematického modelování ve 2D, příp. 1D. Model bude proveden až do místa transformace povodňové vlny na hydrologický průtok Q_{100}.

Požadavky na zpracování diplomové práce:

1. Popis zájmového území.
2. Hydrologická data.
3. Analýza způsobu porušení hráze VD Plumlov a parametry průlomové vlny.
4. Modelování proudění pod VD Plumlov.
5. Závěry.
6. Přílohy.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je pomocí matematického modelování proudění vody ve 2D stanovit rozliv zvláštní povodňové vlny pod VD Plumlov a v přilehlém inundačním území. Výstupem tohoto modelu jsou mapy záplavového území s vyznačenými zasaženými plochami.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vodní dílo, zemní sypaná hráz, přehradní nádrž, zvláštní povodeň, protržení hráze, vnitřní eroze, ohrožené území

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to determine the extent of territory endangered by dam break flood wave under Plumlov dam, using 2D mathematic modelling of water flow under the dam and in the inundation nearby. Output results of the model are maps of the extent territory with highlighted flood area.

KEYWORDS

Water dam, earthfill embankment dam, water reservoir, dam break flood wave, dam breach, internal erosion, endangered territory

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Karel Pekárek *Modelování zvláštní povodně pod vodním dílem Plumlov.* Brno, 2022. 48 s., 19 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Modelování zvláštní povodně pod vodním dílem Plumlov* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14. 1. 2022

Bc. Karel Pekárek
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Modelování zvláštní povodně pod vodním dílem Plumlov* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14. 1. 2022

Karel Pekárek
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Janu Jandorovi, Ph.D., za jeho přístup, trpělivost a odborné rady při konzultacích k této diplomové práci. Dále děkuji mým rodičům a bratrovi za jejich podporu při studiu a při samotném psaní a kompletaci práce. Také bych chtěl vyzdvihnout ochotu k poskytnutí důležitých dokumentů a doporučení, se kterou mi pomohli pracovníci společnosti VODNÍ DÍLA – TDB a. s. V neposlední řadě bych také chtěl poděkovat Povodí Moravy, s. p. a ČÚZK za poskytnutí podkladových a mapových dat pro model.

OBSAH

1 Úvod 3

2 Popis zájmového území 4

2.1 Popis VD Plumlov 4

2.1.1 Účel vodního díla 5

2.1.2 Kategorie vodního díla 5

2.1.3 Vzdouvací objekt vodního díla 6

2.1.4 Nádrž 9

2.1.5 Funkční objekty na vodním díle 10

2.1.6 Geologické poměry 12

2.2 Řeka Hloučela 13

2.3 Hydrologická data 14

3 Analýza způsobů porušení hráze a parametry průlomové vlny 16

3.1 Definice zvláštní povodně 16

3.2 Definice průlomové vlny a ohroženého území 16

3.3 Analýza příčin možných poruch 17

3.4 Parametry průlomové vlny 18

4 Matematické řešení modelu 19

4.1 Integrace po výšce 20

4.1.1 Rovnice kontinuity 20

4.1.2 Pohybové rovnice 21

4.1.3 Smyková napětí na hladině a na dně 23

4.2 Turbulentní model ve 2D 23

4.3 Matematická formulace modelu proudění v mělkém proudu 24

5 Modelování proudění pod vodním dílem 26

5.1 Seznámení s použitými programy 26

5.1.1 BREACH 26

5.1.2 HEC-RAS 26

5.1.3 QGIS 27

5.2 Extrakce dat pro vytvoření DMT 27

5.3 Stanovení hydrogramu protržení 28

5.4 Modelování proudění 28

5.4.1 Definice varianty řešení ZPV a popis modelu 29
5.5 Popis území zasaženého ZPV 31
6 Závěr 34
7 Literatura a elektronické zdroje 35
8 Seznam zkratek a seznam veličin 37
8.1 Seznam zkratek 37
8.2 Seznam symbolů a veličin 37
9 Seznam tabulek 39
10 Seznam obrázků 40
11 Seznam příloh 41

1 ÚVOD

Žádné stavební konstrukce nejsou zcela se stoprocentní jistotou chráněné vůči poškozením způsobenými vnějšími vlivy. Přispět k takovým poškozením mohou i vlivy vnitřní, jako např. chybný design konstrukce, nedodržené technologické postupy při výstavbě a z toho plynoucí materiálové defekty. Předem proto nelze garantovat, že v průběhu provozu stavební konstrukce se neobjeví porucha nebo fatální selhání vlivem těchto vnějších nebo částečně i vnitřních faktorů. Vodní díla (dále jen „VD“) nejsou v tomto ohledu žádnou výjimkou, a to jak v České republice, tak ve světě. Správcům a provozovatelům všech vzdouvacích konstrukcí z toho vyplývá povinnost, snažit se o zachování bezpečnosti a provozuschopnosti daných konstrukcí za takových podmínek, aby bylo obyvatelstvo chráněné před vlivy možné poruchy a jejími následky [1].

Otázka bezpečnosti přehrad a ostatních vzdouvacích objektů je ve světě stále velmi citlivá a diskutovaná. Lze sice pozorovat, že pozitiva plynoucí z užívaní vodních děl převažují nad negativy a případnými škodami způsobenými jejich poruchou či špatným provozem, ale dnešní společnost a odborná veřejnost je na míru zajištění bezpečnosti všech konstrukcí stále náročnější. Tento tlak od společnosti nutí vodohospodářský průmysl k tomu, aby rizika spojená s existencí vodních děl byla za každou cenu co nejvíce snižována [1].

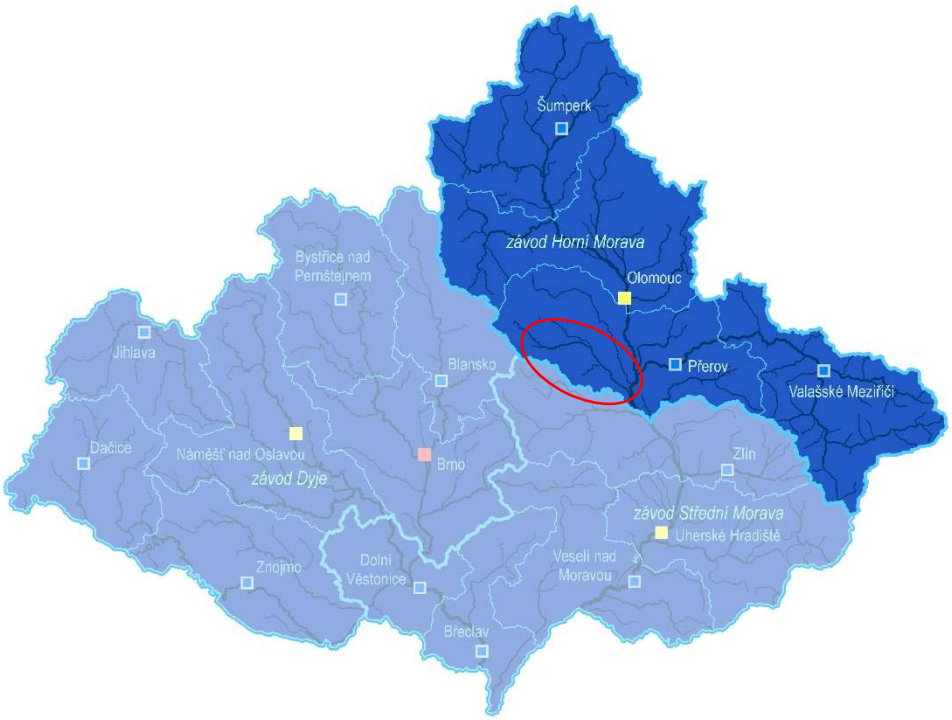
Obecně platí, že zvyšování bezpečnosti vodních děl je u naprosté většiny z nich možné, ovšem studie, projekce a následná realizace stavebních úprav a nutných doplňkových opatření jsou velmi finančně nákladné operace, které vyžadují pečlivé naplánování a zvážení, aby byly dostatečně efektivní [1].

Jestliže na vodním díle nastává situace, kdy již nelze zabránit porušení jeho konstrukce, pak výsledkem jeho destrukce je tzv. „zvláštní povodeň“. Rozsah rozlivu zvláštní povodně pak určuje oblast ohroženého území, právě touto zvláštní povodní [1].

Úkolem této diplomové práce je určení rozsahu oblasti ohroženého území rozlivem zvláštní povodně pod Plumlovskou přehradou, která je ve správě Povodí Moravy, s. p.

2 POPIS ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ

Celé zájmové území se nachází v Olomouckém kraji. Studovaný úsek řek Hloučela a poté Valová za soutokem Hloučela-Romže je situován pod VD Plumlov. Toto vodní dílo stojí přibližně 3 km západně od města Prostějov ve stejnojmenném okrese. Řeka Hloučela vytékající z VD Plumlov prochází severní částí Prostějova a za městem se vlévá do řeky Romže. Tímto soutokem vzniká řeka Valová, která dále míří jihovýchodním směrem. Severně od města Kojetín se Valová spojuje s řekou Moravou, kde zájmový úsek končí. Celková délka zájmového území podél jmenovaných vodních toků činí cca 27,5 říčních kilometrů.



Obr. č. 1 Mapa zvýrazňující závod Horní Morava a s označením zájmové lokality [4]

2.1 Popis VD Plumlov

Údolní nádrž Plumlovské přehrady byla vybudována mezi lety 1913 a 1929 na ř. km 9,7 toku říčky Hloučely. Svým stářím se řadí k nejstarším nádržím v celém povodí řeky Moravy. Nachází se na okraji obce Mostkovice přibližně 2 km od okraje zástavby města Prostějov. Hráz je situována v místech, kde se historicky nacházely dva rybníky, Stichovský a Zlechovský. Právě stavební úpravou a zvýšením hráze Stichovského rybníka z původních 5 m na současných 17 m vzniklo VD Plumlov. Technicky jde o zemní sypanou hráz s návodním jílovým těsněním [2], [5].

Všeobecné údaje:

- Číslo hydrologického pořadí: 4-12-01-0570-1-00
- Kraj: Olomoucký
- Nadřízená obec s rozšířenou působností: Prostějov
- Obec: Mostkovice, Plumlov, Stichovice
- Vydání vodoprávního povolení stavby: 22. 12. 1911
- Budování vodního díla: 1913-1914 a 1922-1929
- Uvedení díla do trvalého provozu: 01. 08. 1936
- Správce díla: Povodí Moravy, s. p. [2], [5]

2.1.1 Účel vodního díla

Stejně jako většina přehradních nádrží v České republice je VD Plumlov považováno za tzv. „víceúčelovou vodní nádrž". Jejím primárním účelem je ochrana obyvatelstva před povodněmi – snížení povodňových průtoků.

Dalšími účely vodního díla však jsou:

- Akumulace vody k nadlepšení průtoků pro:
  - Zajištění minimálního průtoku pod VD (*MQ* = 128 l/s) ve prospěch řeky Hloučely a mlýnského náhonu
  - Zajištění odběrů pro drobné odběratele povrchových vod
  - Zajištění jednorázových vodáckých akcí
  - Využití jako nouzový zdroj vody pro město Prostějov v případě kritického nedostatku u dodávek vody z vodárenských zdrojů
- Rekreace a vodní sporty
- Rybí hospodářství
- Energetika [3]

2.1.2 Kategorie vodního díla

Vodní díla jsou dle předpisů v České republice rozdělena a z hlediska bezpečnosti zařazována do vymezených kategorií s ohledem na vznik možných škod, které mohou být způsobeny porušením stability vzdouvacího objektu a na základě toho snížením bezpečnosti příslušného vodního díla, což je doprovázeno vznikem vlny zvláštní povodně. Vyhláška Ministerstva zemědělství č. 471/2001 Sb. o technickobezpečnostním dohledu nad vodními díly [7], ve znění pozdějších předpisů, stanovuje kritéria a postupy pro zařazení vodních děl do jedné ze čtyř možných kategorií. VD Plumlov se dle ustanovení § 4 vyhlášky

č. 471/2001 Sb., o technickobezpečnostním dohledu nad vodními díly [7], ve znění pozdějších předpisů, řadí do I. kategorie [3]. Tab. č. 1 zobrazuje a popisuje všechny kategorie vodních děl, hodnotící hlediska a požadované bezpečnosti.

Tab. č. 1 Požadovaná míra bezpečnosti vodních děl při povodni [8]

Skupina vodních děl	Označení výše škody	Kategorie vodního díla	Hodnotící hlediska	Požadovaná míra bezpečnosti vodního díla	
				P* = 1/*N	***N***
A	Velmi vysoké	I. – II.	Očekávají se značné ztráty na lidských životech	0,0001	10 000
		II.	Ztráty na lidských životech jsou nepravděpodobné	0,0005	2 000
B	Vysoké	III. – IV.	Očekávají se ztráty na jednotlivých lidských životech	0,001	1000
			Ztráty na lidských životech jsou nepravděpodobné	0,005	200
C	Nízké	IV.	Škody pod vodním dílem a ztráty z užitku	0,01	100
			Ztráty jsou jen u vlastníka, ostatní škody jsou nevýznamné	0,02 až 0,05	50 až 20

2.1.3 Vzdouvací objekt vodního díla

VD Plumlov se řadí mezi zemní sypané hráze přímé, s návodním jílovým těsněním, které je doplněno fólií [2], [5].

Střední část hrázového tělesa je nasypána z netříděných svahových a suťových zemin. Tento materiál má hlinitý charakter s příměsí 30 až 60 % hrubozrnnějších materiálů do velikosti zrna 15 cm. Šířka střední časti je v blízkosti koruny hráze 2,5 m a v základové spáře 25 m [2].

Návodní část, která plní těsnící funkci má tloušťku u koruny hráze 2,0 m a v základové spáře 14,0 m. V rozsahu od zhlaví patní zdi na kótě 262,58 m n. m. po kótu 267,70 m n. m. je nainstalováno návodní fóliové těsnění z PVC, tloušťky 2,5 mm, které zajišťuje těsnící

funkce hráze, a to z důvodu drénu vedeného v hrázi podél patní zdi – ve vzdálenosti cca 10 m. Svah návodního líce hráze je odstupňován třemi bermami. Nejníže položená z nich má šířku 2,2 m, zbylé dvě jsou pak široké 0,8 m. Opevnění návodního svahu je provedeno v jeho horní polovině kamennou dlažbou tloušťky 30 cm do cementové malty. Jedná se o část od kóty 271,40 m n. m. po korunu hráze. Pod uvedenou kótou je stabilizační část provedena z lomového kamene s urovnáním líce. Mezi stabilizační částí a jílovitou zeminou (resp. fóliovým těsněním) je vytvořena přechodová vrstva tloušťky 2 × 0,35 m (z frakcí 0-4 mm, 0-63 mm) [2].

Na vzdušní straně stabilizační části hráze je použit lomový kámen prosypávaný štěrkem. Povrch vzdušního svahu je ohumusován a oset. Stejně jako na návodní straně je svah vzdušního líce přehrady rozdělen třemi bermami [2].

V patě hráze se nachází betonová těsnící zeď procházející písčitými štěrky až do hloubky 12 m pod základovou spáru. Tato zeď je zavázána do pískovců a břidlice [2].

Hráz je odvodněna kameninovou drenáží ∅ 10 cm, které vede od návodního líce hráze směrem na vzdušní patu. Odvodňovací příkop je zasypán a na jeho dno byla instalována drenáž ∅ 16 cm, která je obsypána 15 cm tlustou štěrkopískovou vrstvou. Povrch příkopu je zatravněn. Na koruně hráze je 5,0 m široká vozovka se zdí ve funkci vlnolamu na návodní straně. Na obou stranách této vozovky je instalováno ocelové zábradlí [2].

Obr. č. 2 Pohled na věžový výpustný objekt a korunu hráze [6]

Obr. č. 3 Letecký snímek zátopy přehradní nádrže [9]

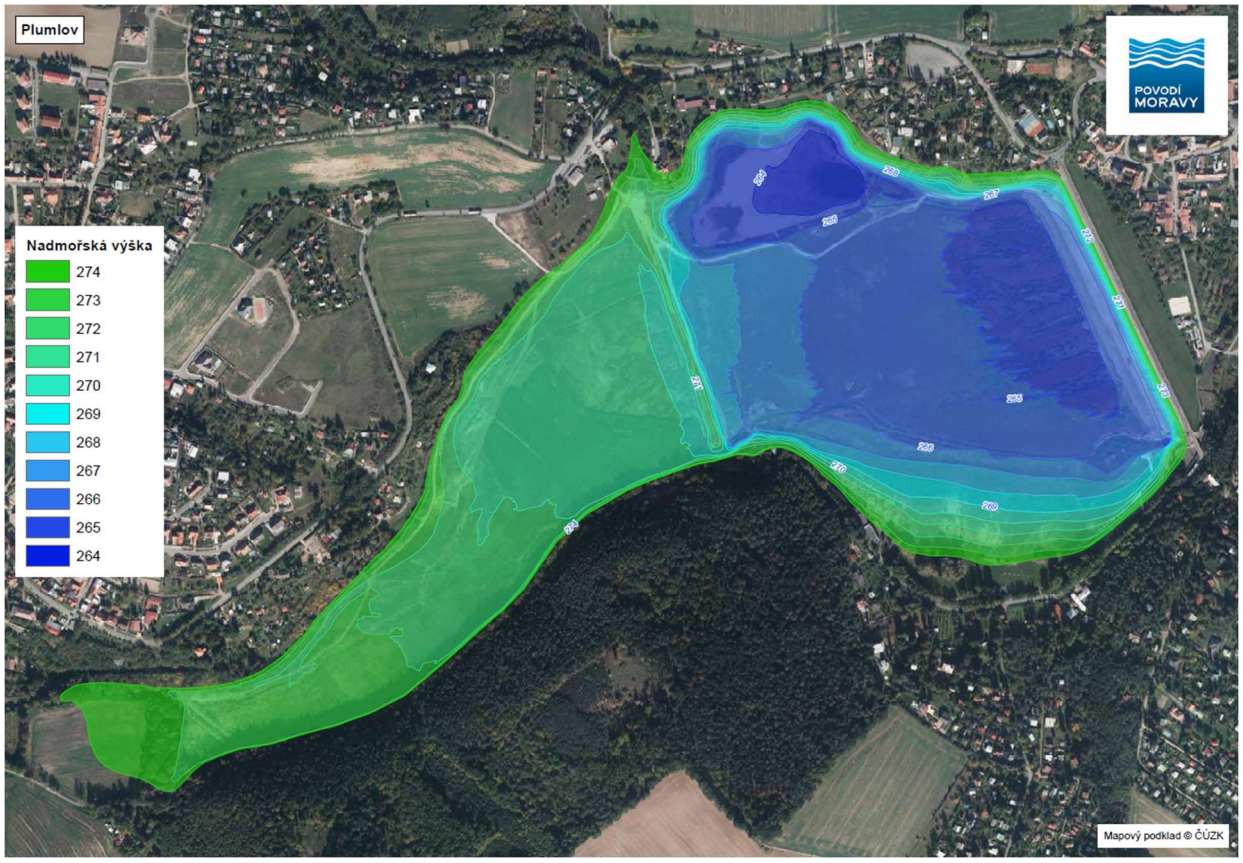
Základní technické parametry hrázového tělesa VD Plumlov (po dokončení rekonstrukce díla v roce 2013) shrnuje následující tabulka.

Tab. č. 2 Technické parametry hráze [2], [3]

Délka koruny hráze	469,5 m
Výška koruny hráze nade dnem údolí	17,0 m
Šířka koruny hráze	5,0 m
Kóta koruny hráze	278,63 m n. m.
Kóta vlnolamu	278,85 m n. m.
Objem hráze	232 486 m^3
Sklon návodního líce hráze pod korunou	1:1,9
Kóta první bermy na návodní straně šířky 0,80 m	275,40 m n. m.
Sklon návodního líce hráze pod první bermou	1:1,9
Kóta druhé bermy na návodní straně šířky 0,80 m	271,40 m n. m.
Sklon návodního líce hráze pod druhou bermou	1:2,2
Kóta třetí bermy na návodní straně hráze šířky 2,20 m	268,70 m n. m.
Sklon návodního líce hráze pod třetí bermou	1:3
Sklon vzdušního líce hráze pod korunou	1:1,4
Kóta první bermy na vzdušní straně šířky 0,80 m	273,58 m n. m.
Sklon vzdušního líce hráze pod první bermou	1:1,9
Kóta druhé bermy na vzdušní straně šířky 1,00 m	269,58 m n. m.
Sklon vzdušního líce hráze pod druhou bermou	1:2,4
Kóta třetí bermy na vzdušní straně hráze šířky 1,00 m	265,58 m n. m.
Sklon vzdušního líce pod třetí bermou k patě hráze	1:3,1

2.1.4 Nádrž

Pokud voda v nádrži dosahuje maximální hladiny v úrovni kóty 277,58 m n. m. činí zatopená plocha Plumlovské přehrady 74 ha a zátopa má délku 1,8 km. Břehy zatopené plochy jsou zpevněny kamenným záhozem a vegetací. Část pravého břehu v délce 200 m je pak zpevněna dlažbou [2].



Obr. č. 4 Zobrazení hloubek v nádrži v závislosti na nadmořské výšce hladiny [10]

Přiložený Obr. č. 4 znázorňuje přesné zobrazení zatopených ploch při různých hloubkách vody v nádrži. Následující tabulky pak popisují přesné rozdělení funkčního prostoru v nádrži [2].

Tab. č. 3 Prostor stálého nadržení [3]

Kóta dna nádrže	263,40 m n. m.
Kóta hladiny stálého nadržení H_s	266,38 m n. m.
Objem prostoru stálého nadržení	0,341 mil. m^3
Zatopená plocha při hladině stálého nadržení	23 ha

Tab. č. 4 Prostor zásobní [3]

Kóta minimální hladiny zásobního prostoru	266,38 m n. m.
Kóta maximální hladiny zásobního prostoru H_z	273,58 m n. m.
Objem zásobního prostoru	2,883 mil. m^3
Zatopená plocha při maximální zásobní hladině	56 ha

Tab. č. 5 Prostor retenční ovladatelný [3]

Kóta minimální hladiny ovladatelného retenčního prostoru	273,58 m n. m.
Kóta maximální hladiny ovladatelného retenčního prostoru (kóta přelivné hrany)	276,43 m n. m.
Objem ovladatelného retenčního prostoru	1,784 mil. m^3
Zatopená plocha při maximální hladině ovladatelného retenčního prostoru	69 ha

Tab. č. 6 Prostor retenční neovladatelný [3]

Kóta minimální hladiny ovladatelného retenčního prostoru (kóta přelivné hrany)	276,43 m n. m.
Kóta maximální hladiny neovladatelného retenčního prostoru	277,58 m n. m.
Objem neovladatelného retenčního prostoru	0,849 mil. m^3
Zatopená plocha při maximální hladině	74 ha

Tab. č. 7 Celkový prostor nádrže [3]

Kóta maximální hladiny H_{max}	277,58 m n. m.
Celkový objem nádrže	5,857 mil. m^3
Celková zatopená plocha	74 ha

2.1.5 Funkční objekty na vodním díle

Výpustný objekt

Objekt spodních výpustí slouží k udržování stálé hladiny v nádrži na požadované kótě a k regulaci vypouštěného množství vody z nádrže. U VD Plumlov je výpustný objekt tvořen nátokovou částí, betonovou suchou věží a odpadní štolou, která je od věže oddělena betonovou přepážkou. Věž výpustného objektu je umístěna při pravém břehu nádrže ve vzdálenosti asi 10 m od bezpečnostního přelivu. Výška vypouštěcí věže činí 26,5 m a její vnitřní půdorys je kruhový, vnější vejčitý. Z vnější strany je věž obložena kamennými kvádry tloušťky 30 cm. V horní části věže se nachází strojovna, která je přístupná z koruny hráze

ocelovou lávkou šířky 1,8 m. Výpustný objekt obsahuje dvojici spodních výpustí DN 1200 a jednu tzv. „hospodářskou výpust" DN 500. Na všech třech výpustných potrubích jsou instalována nožová šoupátka jako revizní uzávěry a klínová šoupátka jako uzávěry provozní, regulační. Nožové šoupě je schopno uzavřít výpust do plného průtoku při jakékoliv hladině v nádrži. Kromě výše jmenovaných výpustných potrubí obsahuje vypouštěcí věž ještě dobudované odběrné potrubí DN 700 pro malou vodní elektrárnu (dále jen „MVE"). Kapacita obou spodních výpustí DN 1200 je 24,8 m^3/s při maximální hladině v nádrži na kótě 277,58 m n. m. Všechna výpustná potrubí včetně výtoku ze savky MVE ústí do společné odtokové štoly. Tato odpadní štola je železobetonová, obložená lomovým kamenem tloušťky 30 cm. Délka odpadní štoly od výpustné věže až po výtok do vývaru č. 1 je 36 m. Její profil je čtvercového průřezu, o rozměrech 3,2 × 3,2 m a je skloněna v podélném spádu 2,5 ‰ [2], [3].

Bezpečnostní přeliv

Konstrukce bezpečnostního přelivu VD Plumlov se nachází na pravém břehu nádrže. Jde o volný boční přeliv v délce 61,1 m, který je půdorysně zakřivený. Konstrukci přelivu tvoří přelivná zeď s přelivnou hranou, spadiště a skluz, který je zaústěn do vývaru č. 1. Hloubka spadiště činí 2,4 až 2,8 m. Na spadiště navazující skluz bezpečnostního přelivu je zakončen obloukovým přechodem do svislé stěny, která končí ve vývařišti č. 1 pod vyústěním odpadní štoly spodních výpustí. Celý objekt je založen na skalním podloží [2], [3].

Tab. č. 8 Parametry bezpečnostního přelivu [2], [5]

Kóta přelivné hrany	276,43 m n. m.
Délka přelivné hrany	61,14 m
Kapacita bezpečnostního přelivu při maximální hladině na kótě 277,58 m n. m.	133,5 m^3/s
Výška přepadového paprsku při maximální hladině	1,15 m

Vývar

Do vývaru č.1 je vyústěna odtoková štola spodních výpustí a skluz bezpečnostního přelivu. Skluz ze štoly do vývaru je zpevněn dlažbou. Ve dně vývaru jsou pro utlumení energie a usměrnění proudu umístěny betonové rozražeče ve dvou řadách. Každý z nich má výšku 1,9 m. Délka vývaru č. 1 činí 19,84 m a je zakončen betonovým prahem, za kterým se nachází vývar č. 2. Ten je dlouhý 30 m a široký 20 m. Jeho dno tvoří skála, případně je zpevněno betonem. Stejně jako vývar č. 1 je i vývar č. 2 ukončen přepadovým prahem [2].

MVE Plumlov

Mezi lety 2018 a 2019 byla ve věžovém objektu spodních výpustí vybudována nová MVE se dvěma soustrojími. Větší soustrojí je tvořeno horizontální kolenovou turbínou typu Kaplan. Tato turbína je napojena na nové přívodní potrubí DN 700 a nachází se vedle levé spodní výpusti. Menší soustrojí je napojeno na potrubí hospodářské výpusti. Jde o čerpadlo v turbínovém režimu. Díky těmto dvěma soustavám je možné v MVE zpracovávat průtoky od 128 l/s do 1050 l/s [2].

Parametry turbín obou soustrojí:

- Turbína typu Kaplan
  - průměr oběžného kola 430 mm
  - počet oběžných lopatek 4
  - rozsah průtoků 0,14 až 0,88 m^3/s
  - rozsah spádů 7,34 až 9,46 m
  - rozsah výkonů na hřídeli 7 až 72 kW
  - jmenovité / průběžné otáčky 1010 / 2800 otáček/min
  - instalovaná sací výška + 1,62 až + 2,06 m
- Turbína typu čerpadlo v turbínovém režimu
  - provozní rozsah průtoků 0,128 až 0,170 m^3/s
  - provozní rozsah čistých spádů 6,1 až 10,3 m
  - provozní rozsah výkonů na spojce 6,1 až 12,1 kW
  - maximální průběžné otáčky 3000 otáček/min
  - instalovaná sací výška + 0,89 až + 1,33 m [2]

2.1.6 Geologické poměry

Plumlovská nádrž se nachází na geologické hranici kulmu a hornin mladších třetihor. Lze si všimnout, že kulmské břidlice při zavázání hráze na obou úbočích vystupují na povrch. Toto skalní podloží je po celé délce hráze přerušeno četnými tektonickými zlomy. Nejvýraznější z nich je situován v levostranném zavázání hráze. Tam skalní podloží klesá strmě pod základovou spáru hráze. Dno tohoto skalního podloží se nepodařilo určit pomocí původních ani nově vybudovaných vrtů. Šířka tektonického zlomu v horní části činí v ose hráze přibližně 65 m. Tento tektonický pokles je vyplněn ve spodní vrstvě jemnými písky a vrstvou jílů s mocností asi 7,5 m. Tyto jíly se vyznačují šedozelenou až šedomodrou barvou. Jejich konzistence je pevná, téměř tvrdá. Při pokračování dále k pravostrannému zavázání má povrch skalního podloží mírně stoupající průběh a zvedá se směrem

k pravostrannému úbočí. Ve vzdálenosti přibližně 20 m před věží výpustného objektu se povrch skalního podloží prudce zvedá až do úrovně cca 1,5 m pod korunu hráze. Tektonické zlomy mají svůj půdorysný průběh šikmý na osu hráze. Jejich přesný směr však nelze z provedených sond s jistotou určit. V levé straně údolí je půdorysný průběh tektonických zlomů šikmý směrem ke středu nádrže a nekopíruje průběh údolí. Dále ke středu nádrže tektonický příkop pokračuje. Jeho okraje byly zastiženy a zdokumentovány při hloubení jámy pro návodní zeď [3].

Podloží základové spáry hráze tvoří eluviální, deluviální a fluviální sedimenty, které mají formu štěrků. Ty jsou poté místně kryty vrstvami jemnozrnných písků a jílů. V místě levostranného tektonického poklesu činí mocnost štěrkovitých vrstev asi 6,0 m dále ve směru k pravostrannému zavázání hráze je to od 3,5 do 5,5 m. Síla vrstvy horních jílovitých zemin je v rozsahu od 0 do 3,5 m. Dobudovaná návodní těsnící zeď byla založena směrem od výpustné věže v délce 212 m v kulmské břidlici. V místech výše popsaného levobřežního tektonického zlomu je zeď založena v délce asi 45 m na šedomodrých tuhých jílech v hloubce přibližně 1,2 m. Na vzdušním líci hráze byl zachován násyp původní hráze Stichovického rybníka. Tato hráz je složena výhradně z černých jílovitých hlín. Ty mají tuhou konzistenci a je v nich zaznamenán výskyt organických částic. Při výkopu základů dobudovávané návodní těsnící zdi se ukázalo, že všechny vrstvy podloží včetně štěrkových jsou velmi málo propustné. To způsobila kolmatace bahna z rybničního dna bývalého Stichovského rybníka na těchto vrstvách [3].

Věžový objekt spodních výpustí v pravém úbočí, odpadní štola spodních výpustí, bezpečnostní přeliv a odpad od bezpečnostního přelivu jsou založeny taktéž na skalním masívu z kulmských břidlic. Při výstavbě se odhalilo, že jsou tyto břidlice proloženy četnými zlomy a poruchami. Tyto poruchy jsou buď bez výplně nebo jsou vyplněny deluviálními sedimenty [3].

2.2 Řeka Hloučela

Řeka Hloučela teče za vyústěním z Plumlovské nádrže východním směrem poměrně rovinatou krajinou etnografické oblasti Hané. V obci Mostkovice protéká kamenným korytem a celkem třikrát zde kříží silnici II. třídy vedoucí z Prostějova do Plumlova. V Mostkovicích také začíná kolem řeky vegetační pás, který je označen jako „biokoridor Hloučela“ a je vyhlášeným chráněným územím, které se táhne podél celého dolního toku řeky až po soutok s Romží, kde z obou jmenovaných toků vzniká řeka Valová. Za křížením Hloučely se silnicí III. třídy vedoucí z Domamyslic do Smržice je kolem řeky od roku 2013

vybudována cyklostezka, která vede až do Prostějova. Řeka Hloučela v tomto úseku přirozeně meandruje. Šířka jejího koryta zde nepřesahuje hodnotu 5 m [11].

Řeka Hloučela i v severní části Prostějova plynule meandruje a nadále teče východním směrem. I při protékání městské zástavby je řeka stále obklopena minimálně 50 m širokým pásem zeleně, ve kterém se nachází i vzrostlé stromy. Za prostějovskou ulicí Kosteleckou kříží Hloučelu silnice II. třídy Prostějov – Kostelec na Hané a stejnosměrná trať železnice. I nadále řeka meandruje, a to skrze průmyslové zóny a zahrádkářské kolonie. Dále na toku řeka Hloučela napájí pivovarský (vrahovický) rybník [11].

Vodoteč je dále na toku regulována v hlubším korytě, které míří jihovýchodním směrem kolem bývalého pivovaru a sladoven, kde se kříží s ulicí Vrahovickou. Poté řeka Hloučela mění plynule směr na východní, a dále pokračuje kolem zemědělských ploch, až k soutoku se zleva přitékající řekou Romží. Soutok obou vodních toků je situován v prostějovské místní části Vrahovice, nedaleko místního koupaliště. Za soutokem se již dále tekoucí řeka nazývá Valová. Tato řeka se u obce Uhřičice vlévá do Moravy, kde končí stanovené zájmové území [11].

2.3 Hydrologická data

Základní hydrologické podklady dle ČSN 75 1400 [12] pro profil hráze VD Plumlov jsou uvedeny v aktuálně platném manipulačním řádu vodního díla [2] a zde je vypsán jejich souhrn:

- Číslo hydrologického pořadí: 4-12-01-057
- Plocha povodí: 119,58 km^2
- Průměrný roční průtok (Q_a): 0,650 m^3/s (1931-1980)
- Specifický odtok (q_a): 4,895 $l/s/km^2$
- Průměrný roční úhrn srážek (*Hs*): 654 mm
- Předpokládané ztráty výparem: 682 mm/rok (274 m n. m.) [2]

Tab. č. 9 ***m*–denní průtoky [2]**

m	30	90	180	270	330	355	364
Q_m [m^3/s]	1,600	0,600	0,230	0,080	0,020	0,009	0,001

Tab. č. 10 ***N*–leté průtoky [2]**

Doba opakování	1	2	5	10	20	50	100
Q_N [m^3/s]	7	10,9	16,5	21,3	26,6	34,5	41

Na základě matematického modelového výzkumu společnosti Aquatis a. s. z roku 2016 byla stanovena nová měrná křivka konstrukce v současnosti již stávajícího bezpečnostního přelivu. Ve stejném roce byly ověřeny hydrologické údaje profilu hráze od ČHMÚ, jejichž platnost byla prodloužena do roku 2021. Na těchto ověřených datech byly poté pomocí dvou rozdílných metod vypracovány teoretické povodňové vlny $KPV_{10\ 000}$. Použitými metodami byly klasická statistická extrapolační metoda a deterministický srážko-odtokový model povodí [2]. Výsledky jednotlivých metod shrnuje tab. č. 11.

Tab. č. 11 Výsledné hodnoty metod pro zjištění parametrů $KPV_{10\ 000}$ [2]

	$Q_{10\ 000}$ [m^3/s]	$WPV_{10\ 000}$ [mil. m^3]
$KPV_{10\ 000}$ (klasická metoda)	195,0	27,0
$KPV_{10\ 000}$ (deterministický model)	199,6	27,0

3 ANALÝZA ZPŮSOBŮ PORUŠENÍ HRÁZE A PARAMETRY PRŮLOMOVÉ VLNY

3.1 Definice zvláštní povodně

Zvláštní povodeň je specifický typ povodně, která je způsobená havárií, selháním nebo fatální poruchou vodního díla, jenž vzdouvá nebo akumuluje vodu. Tento typ povodně může vzniknout také nouzovým řešením kritické situace na vodním díle, která vyvolává mimořádnou událost v území pod příslušným vodním dílem. Dle metodického pokynu odboru ochrany vod Ministerstva životního prostředí (dále jen „MŽP“) pro zpracování plánu ochrany území pod vodním dílem před zvláštní povodní [13] rozeznáváme tři základní typy zvláštních povodní dle charakteru situace, která může nastat při stavbě nebo při provozu vodního díla:

- ZPV typu 1 – vzniká protržením hráze vodního díla
- ZPV typu 2 – vzniká poruchou hradicí konstrukce bezpečnostních a výpustných zařízení vodního díla (neřízený odtok vody)
- ZPV typu 3 – vzniká nouzovým řešením kritické situace ohrožující bezpečnost vodního díla prostřednictvím nezbytného mimořádného vypouštění vody z vodního díla, zejména při nebezpečí havárie uzávěrů a hrazení bezpečnostních a výpustných zařízení nebo při nebezpečí protržení hráze vodního díla [13]

Zvláštní povodeň může vzniknout také jako důsledek teroristického útoku nebo vojenské činnosti [13].

3.2 Definice průlomové vlny a ohroženého území

Průlomová vlna při zvláštní povodni vyvolává prudké zvýšení průtoků a vodních stavů. Vlna tohoto typu je charakteristická extrémními průtoky, vysokou rychlostí (až 50 km/h), značnými destrukčními účinky (ničení mostních objektů, železničních násypů, silnic, budov, ochranných hrází aj.), ohrožením rozsáhlých území, která jsou výrazně větší než vymezená záplavová území při přirozených povodních. Také se vyznačuje vysokou pravděpodobností ohrožení lidských životů a majetku v zasažené lokalitě. Graficky se dá průlomová vlna vyjádřit v podobě hydrogramu v určitém profilu na vodním toku [13].

Území, které se označuje za ohrožené zvláštní povodní může být při vzniku zvláštní povodně zaplaveno vodou a jiným vyplaveným materiálem. Vymezuje se kulminační hladinou při zvláštní povodni a ve směru po toku končí v profilu, kde kulminační průtok zvláštní povodně klesá na hodnotu průtoku přirozené povodně s dobou opakování 100 let (Q_{100}), který vymezuje záplavové území. Postup na úseku toku pod tímto územím se řídí

územně příslušným povodňovým plánem. Rozsah území je vymezen v krizovém plánu v souladu s krizovým zákonem [13], [14].

3.3 Analýza příčin možných poruch

Pokud analyzujeme nejčastější poruchy sypaných hrází, pro vytvoření rámcové představy o této problematice, používá se statistika americké studie dle Middlebrooka [15], která uvádí krátkou historii zemních sypaných a kamenitých hrází postavených na území USA. Tato statistika uvádí také příčiny jejich poškození. Jde v ní celkem o 220 vodních děl, které mezi léty 1850–1950 vykazovaly prvky nebezpečného poškození. Výsledky studie jsou zachyceny v tab. č. 12 a č. 13.

Tab. č. 12 Příčiny poškození sypaných hrází v USA mezi lety 1850 až 1950 [15]

Příčina porušení	Zdroj porušení	Procento
Přelití	Povodeň	30 %
Vnitřní eroze	Průsak	25 %
Netěsnost potrubních výpustí	Vnitřní eroze	13 %
Úprava (dláždění) svahu	Piping	5 %
Sesuv	Různé	15 %
Různá		7 %
Neznámá		5 %

Tab. č. 13 Stáří vodních děl v době kritické poruchy [15]

Počet roků od výstavby hráze	Příčina poruchy (%)				Celkem
	Přelití	Netěsnost potrubních výpustí	Vnitřní eroze	Sesuv	(%)
0–1	9	23	16	29	19 %
1–5	17	50	34	24	31 %
5–10	9	9	13	12	11 %
10–20	30	9	13	12	16 %
20–50	32	9	24	23	22 %
50–100	3	0	0	0	1 %

Specifikace zvláštních povodní pro VD Plumlov zahrnuje několik, více nebo méně pravděpodobných scénářů. Výsledkem každého z nich by byla zvláštní povodeň jednoho ze tří možných typů (ZPV 1, 2, nebo 3) [3]. Varianta zpracovávaná v řešení této diplomové práce spadá mezi ZPV 1.

Rozdělení možných narušení tělesa hráze (ZPV 1):

- Vnější eroze hráze při jejím přelití (důsledkem hydrologické povodně)
- Průsaková eroze hráze nebo podloží
- Porucha stability hráze, následky zemětřesení apod.
- Eroze hráze při jejím přelití v důsledku sesuvu hornin do nádrže [3]

3.4 Parametry průlomové vlny

V dokumentu „Program TBD pro trvalý provoz" [3] se uvádí, že z analýzy možných příčin poruchy hráze VD Plumlov se jako nejpravděpodobnější příčina vzniku ZPV 1 jeví vnitřní průsaková eroze. Ta může vzniknout v různých výškových úrovních. Dle dokumentu se nejpravděpodobnější zdá být scénář, kdy počáteční poškození hráze začíná na kótě 264,40 m n. m. v blízkosti drenážního potrubí, které vede od návodního líce hráze směrem na vzdušní patu.

Výchozí podmínky a předpoklady pro výpočet hydrogramu ZPV:

- Typ poruchy: vnitřní eroze
- Počáteční kóta poruchy (průsaku): 264,40 m n. m.
- Počáteční hladina v nádrži: 277,62 m n. m. (čas $T = 0$)
- Počáteční přítok do nádrže: 199,6 m^3/s (hladina v nádrži 277,62 m n. m. a dále dle hydrogramu $KPV_{10\,000}$) [3]

Parametry kontrolní povodňové vlny (viz tab. č. 11 (deterministický model)):

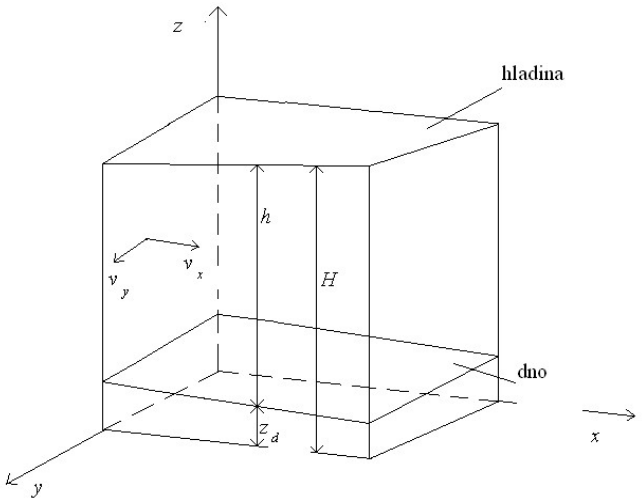
- Kulminační průtok $Q_{10\,000}$ 199,6 m^3/s
- Celkový objem vlny: 27,0 mil. m^3 [2]

Počáteční předpoklady a podmínky, které jsou předmětem této varianty řešení ZPV 1 u VD Plumlov, představují pro vodní dílo extrémní zatěžovací stav, který může nastat pouze při průchodu kontrolní povodňové vlny $KPV_{10\,000}$. Nadále byl počátek vytvoření kritické poruchy vodního díla umístěn na kótu 264,40 m n. m. do místa, kde se nachází drenážní již jmenované drenážní potrubí. Toto je místo, u kterého nelze vyloučit predispozici pro vznik vnitřní eroze, přestože zde nejsou dlouhodobě sledované průsaky ani výtoky vody, dle výsledků šetření TBD [3].

4 MATEMATICKÉ ŘEŠENÍ MODELU

Tato kapitola se zabývá odvozením rovnic dvojrozměrného (dále jen „2D“) matematického modelu proudění vody v relativně malé hloubce s volnou hladinou (dále jen „v mělkém proudu“). V anglických zdrojích se pro tento typ úlohy používá termín „shallow water flow“. Využívaná skupina rovnic se pak nazývá „shallow water equations“ (dále jen „SWE“). Bude zde také představena formulace problému proudění vody v mělkém proudu, která se používá pro řešení proudění ve vodních tocích a jejich inundačním území nebo v mělkých nádržích [16].

2D modelování proudění vody v mělkém proudu řešiteli poskytuje informace o plošném rozdělení rychlostí a hloubek v náhradní oblasti [16]. Oproti 1D modelu je ovšem dvourozměrné modelování proudění v mělkém proudu náročnější na výpočet a na dobu zpracování.



Obr. č. 5 Výřez proudu kapaliny [16]

Při modelování v mělkém proudu se počítá s průměrnou rychlostí po svislici (svislicová rychlost). Základními neznámými funkce jsou:

- $v_{xs}(x,y,t)$, $v_{ys}(x,y,t)$ - složky vektoru svislicové rychlosti;
- $h(x,y,t)$ - hloubka vody.

Pro řešení těchto tří neznámých lze použít rovnice kontinuity a dvě pohybové rovnice. Tyto jmenované rovnice lze odvodit dvěma různými způsoby. První způsob spočívá v integraci po výšce (přes hloubku) a druhý potom využívá odvození z elementu o výšce h [16].

Při odvození se předpokládá že:

- kapalina proudí o volné hladině, jejíž polohu vyjadřuje neznámá funkce $H(x,y,t)$;
- kapalina proudí po pevném dně, jehož tvar je vyjádřen funkcí $z_d(x,y,t)$;
- hloubka kapaliny $h(x,y,t)$ je definována jako rozdíl hladiny a dna:

  $h(x,y,t) = H(x,y,t) - z_d(x,y,t)$;
- tlak na volné hladině je $p = p_a$, kde p_a definuje atmosférický tlak;
- vlivem větru na hladině vznikají smyková napětí τ_{hx} a τ_{hy};
- na dně vznikají vlivem drsnosti povrchu dna smyková napětí τ_{dx} a τ_{dy};
- na kapalinu působí Coriolisovy síly [16].

4.1 Integrace po výšce

Rovnice modelování proudění v mělkém proudu se získají integrací rovnice kontinuity a pohybových rovnic. Svislicovou rychlost lze zapsat ve tvaru:

$$v_{xs} = \frac{1}{h}\int_{z_d}^{H} v_x \, dz, \qquad (4.1)$$

$$v_{ys} = \frac{1}{h}\int_{z_d}^{H} v_y \, dz, \qquad (4.2)$$

kde h je hloubka vody [16].

4.1.1 Rovnice kontinuity

Po integraci rovnice kontinuity a její úpravě pomocí Leibnitzova integračního pravidla[1] se získá tvar:

$$\int_{z_d}^{H}\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) dz = \frac{\partial}{\partial x}(h\, v_{xs}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\, v_{ys}) -$$
$$- \left(\frac{\partial H}{\partial x} v_x^{\text{hlad}} + \frac{\partial H}{\partial y} v_y^{\text{hlad}} - v_z^{\text{hlad}}\right) +$$
$$+ \left(\frac{\partial z_d}{\partial x} v_x^{\text{dno}} + \frac{\partial z_d}{\partial y} v_y^{\text{dno}} - v_z^{\text{dno}}\right) = 0. \qquad (4.3)$$

[1]Leibnitzovo integrační pravidlo se píše ve tvaru:

$$\int_{A(x,t)}^{B(x,t)} \frac{\partial f(x,y,t)}{\partial x}\, dy = \frac{\partial}{\partial x}\int_{A(x,t)}^{B(x,t)} f(x,y,t)\, dy - f(B)\frac{\partial B}{\partial x} + f(A)\frac{\partial A}{\partial x}.$$

Pro složku rychlosti na dně v_z^{dno} platí:

$$v_z^{\text{dno}} = \frac{D(z_d(x,y,t))}{Dt} = \frac{\partial z_d}{\partial t} + v_x^{\text{dno}}\frac{\partial z_d}{\partial x} + v_y^{\text{dno}}\frac{\partial z_d}{\partial y} =$$

$$= v_x^{\text{dno}} \frac{\partial z_d}{\partial x} + v_y^{\text{dno}} \frac{\partial z_d}{\partial y}, \qquad (4.4)$$

kde z_d je konstantní v čase (pevné – nepohyblivé – dno), proto $\frac{\partial z_d}{\partial t} = 0$, v_x^{dno} a v_y^{dno} jsou složky rychlosti na dně [16].

Pro rychlostní složku na hladině v_z^{hlad} platí:

$$v_z^{\text{hlad}} = \frac{D(H(x,y,t))}{Dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + v_x^{\text{hlad}} \frac{\partial H}{\partial x} + v_y^{\text{hlad}} \frac{\partial H}{\partial y}, \qquad (4.5)$$

kde v_x^{hlad} a v_y^{hlad} jsou rychlostní složky na hladině [16].

Dosazením (4.4) a (4.5) do rovnice (4.3) se získá:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(h\ v_{xs}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\ v_{ys}) = 0, \qquad (4.6)$$

kde *h* je hloubka vody ($h = H - z_d$), *H* poloha hladiny a z_d poloha dna [16].

4.1.2 Pohybové rovnice

Pohybové rovnice pro nestlačitelnou kapalinu bez uvažování seizmických účinků, ovšem s uvažováním tíhy a objemových sil vznikajících vlivem otáčení země, lze zapsat ve tvaru:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x^2}{\partial x_x} + \frac{\partial (v_x v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (v_x v_z)}{\partial z} + f v_y = \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}\right),$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{\partial (v_y v_x)}{\partial x_x} + \frac{\partial v_y^2}{\partial y} + \frac{\partial (v_y v_z)}{\partial z} - f v_x = \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z}\right),$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{\partial (v_z v_x)}{\partial x_x} + \frac{\partial (v_z v_y)}{\partial y} + \frac{\partial v_z^2}{\partial z} - g = \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}\right).$$

kde *g* je tíhové zrychlení, *f* Coriolisův parametr:

$$f = 2\Omega\ sin\ \Phi, \qquad (4.7)$$

Ω je úhlová rychlost otáčení země ($7{,}27.10^{-5}$ rad/s) a Φ zeměpisná šířka (kladné hodnoty -> severní polokoule; záporné hodnoty -> jižní polokoule). Pro případy proudění v mělkém proudu, kde je horizontální rozloha vzhledem k hloubce velká, je vliv Coriolisova parametru malý, proto může být v takovém případě zanedbán [16].

Integrací levých stran výše uvedených pohybových rovnic se získá:

$$\int_{z_d}^{H} \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x^2}{\partial x} + \frac{\partial (v_x v_y)}{\partial y} + \frac{\partial (v_x v_z)}{\partial z} - f_x\right) dz =$$

$$\frac{\partial (h v_{xs})}{\partial t} + \frac{\partial (h v_{xs}^2)}{\partial x} + \frac{\partial (h v_{xs} v_{ys})}{\partial y} - f\ h\ v_{ys}, \qquad (4.8)$$

$$\int_{z_d}^{H}\left(\frac{\partial v_y}{\partial t}+\frac{\partial(v_y v_x)}{\partial x}+\frac{\partial v_y^2}{\partial y}+\frac{\partial(v_y v_z)}{\partial z}-f_y\right)dz=$$

$$\frac{\partial(hv_{ys})}{\partial t}+\frac{\partial(hv_{xs}^2)}{\partial x}+\frac{\partial(hv_{xs}v_{ys})}{\partial y}-f\ h\ v_{xs}. \qquad (4.9)$$

Integrací ostatních členů pohybových rovnic s použitím Leibnitzova pravidla se získá:

$$\int_{z_d}^{H}\left(\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\sigma_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial\sigma_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial\sigma_{xz}}{\partial z}\right)\right)dz=\frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x}+\frac{\partial(hT_{xy})}{\partial y}-$$

$$-\left(\tau_{xx}\frac{\partial H}{\partial x}+\tau_{xy}\frac{\partial H}{\partial y}-\tau_{xz}\right)+\left(\tau_{xx}\frac{\partial z_d}{\partial x}+\tau_{xy}\frac{\partial z_d}{\partial y}-\tau_{xz}\right)=$$

$$=\frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x}+\frac{\partial(hT_{xy})}{\partial y}+\tau_x^{\text{hlad}}-\tau_x^{\text{dno}}, \qquad (4.10)$$

$$\int_{z_d}^{H}\left(\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\sigma_{yx}}{\partial x}+\frac{\partial\sigma_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial\sigma_{yz}}{\partial z}\right)\right)dz=\frac{\partial(hT_{yx})}{\partial x}+\frac{\partial(hT_{yy})}{\partial y}-$$

$$-\left(\tau_{yx}\frac{\partial H}{\partial x}+\tau_{yy}\frac{\partial H}{\partial y}-\tau_{yz}\right)+\left(\tau_{yx}\frac{\partial z_d}{\partial x}+\tau_{yy}\frac{\partial z_d}{\partial y}-\tau_{yz}\right)=$$

$$=\frac{\partial(hT_{yx})}{\partial x}+\frac{\partial(hT_{yy})}{\partial x}+\tau_y^{\text{hlad}}-\tau_y^{\text{dno}} \quad \text{[16].} \qquad (4.11)$$

kde T_{xx}, T_{xy}, T_{yy} a T_{yx} jsou smyková napětí způsobená turbulencí a τ_x^{hlad}, τ_x^{dno}, τ_y^{hlad}, τ_y^{dno} smyková napětí na hladině a na dně:

$$\tau_x^{\text{hlad}}=-\tau_{xx}\frac{\partial H}{\partial x}-\tau_{xy}\frac{\partial H}{\partial y}+\tau_{xz}, \quad \text{pro } z=H, \qquad (4.12)$$

$$\tau_x^{\text{dno}}=-\tau_{xx}\frac{\partial z_d}{\partial x}-\tau_{xy}\frac{\partial z_d}{\partial y}+\tau_{xz}, \quad \text{pro } z=z_d, \qquad (4.13)$$

$$\tau_y^{\text{hlad}}=-\tau_{xy}\frac{\partial H}{\partial x}-\tau_{yy}\frac{\partial H}{\partial y}+\tau_{yz}, \quad \text{pro } z=H, \qquad (4.14)$$

$$\tau_y^{\text{dno}}=-\tau_{xy}\frac{\partial z_d}{\partial x}-\tau_{yy}\frac{\partial z_d}{\partial y}+\tau_{yz}, \quad \text{pro } z=z_d. \qquad (4.15)$$

Výsledné pohybové rovnice lze zapsat ve tvaru:

$$\frac{\partial(hv_{xs})}{\partial t}+\frac{\partial(hv_{xs}^2)}{\partial x_x}+\frac{\partial(hv_{xs}v_{ys})}{\partial y}-f\ h\ v_{ys}=$$

$$=\frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x}+\frac{\partial(hT_{xy})}{\partial y}+\tau_x^{\text{hlad}}-\tau_x^{\text{dno}}, \qquad (4.16)$$

$$\frac{\partial(hv_{ys})}{\partial t}+\frac{\partial(hv_{xs}^2)}{\partial x_x}+\frac{\partial(hv_{xs}v_{ys})}{\partial y}-f\ h\ v_{xs}=$$

$$=\frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x}+\frac{\partial(hT_{yy})}{\partial x}+\tau_y^{\text{hlad}}-\tau_y^{\text{dno}} \quad \text{[16].} \qquad (4.17)$$

4.1.3 Smyková napětí na hladině a na dně

Smyková napětí na dně

Složky smykového napětí na dně lze vyjádřit ve tvaru:

$$\tau_x^{\text{dno}} = c_f J_d \frac{v_{xs}\sqrt{h^2(v_{xs}^2 + v_{ys}^2)}}{h}, \quad (4.18)$$

$$\tau_y^{\text{dno}} = c_f J_d \frac{v_{ys}\sqrt{h^2(v_{xs}^2 + v_{ys}^2)}}{h}, \quad (4.19)$$

kde c_f je bezrozměrný koeficient tření na dně:

$$c_f = \frac{g}{C^2}, \quad (4.20)$$

J_d definuje sklon dna, C značí Chézyho rychlostní součinitel:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}, \quad (4.21)$$

n poté definuje stupeň drsnosti dle Manninga a R je hydraulický poloměr [16].

Smyková napětí na hladině

Pro jednotlivé složky smykového napětí na hladině vlivem větru platí:

$$\tau_x^{hlad} = c_s \rho_a W^2 \cos \psi, \quad (4.22)$$

$$\tau_y^{hlad} = c_s \rho_a W^2 \sin \psi, \quad (4.23)$$

kde c_s značí bezrozměrný koeficient tření na hladině (c_s = 1,0 až 1,1), ρ_a definuje hustotu vzduchu, W je charakteristická rychlost větru u hladiny a ψ značí úhel mezi směrem větru a kladným směrem osy x [16].

4.2 Turbulentní model ve 2D

V modelování ve 2D se často používá Smagorinského turbulentní model, který zavádí turbulentní viskozitu μ_t do pohybových rovnic (4.16) a (4.17) [16].

V pohybových rovnicích (4.16) a (4.17) jsou pak nově obsažena i smyková napětí od turbulencí:

$$T_{xx} = \mu_t \left(2 \frac{\partial v_{xs}}{\partial x}\right), \quad (4.24)$$

$$T_{xy} = T_{yx} = \mu_t \left(\frac{\partial v_{xs}}{\partial y} + \frac{\partial v_{ys}}{\partial x}\right), \quad (4.25)$$

$$T_{yy} = \mu_t \left(2 \frac{\partial v_{ys}}{\partial y}\right), \quad (4.26)$$

kde turbulentní viskozita μ_t se stanoví z lokální derivace rychlostního pole a velikosti sítě:

$$\mu_t = \alpha\ \Delta x\ \Delta y \sqrt{\left(\frac{\partial v_{xs}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_{ys}}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_{xs}}{\partial y} + \frac{\partial v_{ys}}{\partial y}\right)^2}, \qquad (4.27)$$

kde α značí bezrozměrný koeficient ($0{,}01 \leq \alpha \leq 0{,}5$), Δx a Δy definují rozměry buňky výpočtové sítě [16].

4.3 Matematická formulace modelu proudění v mělkém proudu

Neznámé funkce v případě 2D proudění v mělkém proudu:

- funkce obou složek vektoru svislicové rychlosti $v_{xs}(x,y,t)$ a $v_{ys}(x,y,t)$;
- funkce hloubky vody $h(x,y,t)$
- funkce turbulentní viskozity $\mu_t(x,y,t)$.

K řešení těchto neznámých funkcí je zapotřebí čtyř rovnic. Těmito rovnicemi jsou rovnice spojitosti (4.6), pohybové rovnice (4.16), (4.17) a rovnice Smagorinského turbulentní modelu (4.27) [16].

Dále se předpokládá obecně definovaná oblast Ω s hranicí Γ, která je sjednocením částí Γ_1 a Γ_2, $\Gamma = (\Gamma_1 + \Gamma_2)$ a $(\Gamma_1 \cap \Gamma_2) = 0$. Diferenciální rovnice, které popisují proudění nestlačitelné kapaliny s konstantní viskozitou mají následující tvar:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(h\ v_{xs}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\ v_{ys}) = 0, \qquad (4.6)$$

$$\frac{\partial (h v_{xs})}{\partial t} + \frac{\partial (h v_{xs}^2)}{\partial x_x} + \frac{\partial (h v_{xs} v_{ys})}{\partial y} - f\ h\ v_{ys} =$$

$$= \frac{\partial (h T_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (h T_{xy})}{\partial y} + \tau_x^{\text{hlad}} - \tau_x^{\text{dno}}, \qquad (4.16)$$

$$\frac{\partial (h v_{ys})}{\partial t} + \frac{\partial (h v_{xs}^2)}{\partial x_x} + \frac{\partial (h v_{xs} v_{ys})}{\partial y} - f\ h\ v_{xs} =$$

$$= \frac{\partial (h T_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (h T_{yy})}{\partial x} + \tau_y^{\text{hlad}} - \tau_y^{\text{dno}}, \qquad (4.17)$$

$$\mu_t = \alpha\ \Delta x\ \Delta y \sqrt{\left(\frac{\partial v_{xs}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_{ys}}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_{xs}}{\partial y} + \frac{\partial v_{ys}}{\partial y}\right)^2}, \qquad (4.27)$$

kde

$h = H - z_d$,

$$T_{xx} = \mu_t \left(2\ \frac{\partial v_{xs}}{\partial x}\right), \qquad (4.24)$$

$$T_{xy} = T_{yx} = \mu_t \left(\frac{\partial v_{xs}}{\partial y} + \frac{\partial v_{ys}}{\partial x}\right), \qquad (4.25)$$

$$T_{yy} = \mu_t \left(2 \frac{\partial v_{ys}}{\partial y}\right), \quad (4.)$$

$$\tau_x^{hlad} = c_s \rho_a W^2 \cos \psi, \quad (4.22)$$

$$\tau_x^{\text{dno}} = c_f J_d \frac{v_{xs}\sqrt{h^2(v_{xs}^2 + v_{ys}^2)}}{h}, \quad (4.18)$$

$$\tau_y^{hlad} = c_s \rho_a W^2 \sin \psi, \quad (4.23)$$

$$\tau_y^{\text{dno}} = c_f J_d \frac{v_{ys}\sqrt{h^2(v_{xs}^2 + v_{ys}^2)}}{h}, \quad (4.19)$$

kde H značí polohu hladiny, z_d je poloha dna, c_f je bezrozměrný koeficient tření na dně ($c_f = \frac{g}{C^2}$), J_d definuje sklon dna, C značí Chézyho rychlostní součinitel ($C = \frac{1}{n} R^{1/6}$), n definuje stupeň drsnosti dle Manninga, R je hydraulický poloměr, c_s je bezrozměrný koeficient tření na hladině (c_s = 1,0 až 1,1), ρ_a značí hustotu vzduchu, W definuje charakteristickou rychlost větru u hladiny, ψ je úhel mezi směrem větru a kladným směrem osy x, f značí Coriolisův parametr ($f = 2\Omega \sin \Phi$), Ω je úhlová rychlost otáčení země (7,27.10^{-5} rad/s) a Φ značí zeměpisnou šířku [16].

Počáteční podmínky vyjadřují známé či zadané průběhy funkcí $v_{xs0}(x,y)$, $v_{ys0}(x,y)$, $h_0(x,y,t)$ a μ_{t0} ve všech bodech oblasti Ω v čase T = 0:

$$v_{xs}(x,y,0) = v_{xs}(x,y) \quad \text{na } \Omega \cup \Gamma,$$

$$v_{ys}(x,y,0) = v_{ys0}(x,y) \quad \text{na } \Omega \cup \Gamma,$$

$$h(x,y,0) = h_0(x,y) \quad \text{na } \Omega \cup \Gamma,$$

$$\mu_t(x,y,0) = \mu_{t0}(x,y) \quad \text{na } \Omega \cup \Gamma.$$

Okrajové podmínky:

1. na hranici Γ_1:

$$v_{xs}(x,y,t) = v_{xs}(t)/\Gamma_1, \quad v_{ys}(x,y,t) = v_{ys}(t)/\Gamma_1, \quad \mu_t(x,y,t) = \mu_t(t)/\Gamma_1;$$

2. na hranici Γ_2:

$$h(x,y,t) = h(t)/\Gamma_2,$$

kde $v_{xs}(t)/\Gamma_1$, $v_{ys}(t)/\Gamma_1$ a $\mu_t(t)/\Gamma_1$ jsou zadané hodnoty obou složek vektoru svislicové rychlosti a turbulentní viskozity na Γ_1 a $h(t)/\Gamma_2$ je zadaná hloubka na Γ_2 [16].

Úkolem úlohy je najít neznámé funkce v_{xs}, v_{ys}, h a μ_t, které splňují okrajové a počáteční podmínky, které vyhovují rovnicím (4.6), (4.16), (4.17) a (4.27) [16].

5 MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ POD VODNÍM DÍLEM

5.1 Seznámení s použitými programy

Pro stanovení výsledného hydrogramu ZPV a území ohroženého zvláštní povodní pod VD Plumlov byly použity softwarové prostředky popsané v následujících kapitolách.

5.1.1 BREACH

Americká instituce National Weather Service (dále jen „NWS“) vyvinula postup pro určení charakteristik porušení zemních hrází a pro výpočet odtokových hydrogramů vycházejících z jejich protržení [17]. Procedura známá jako Breach Erosion Model (dále jen „BREACH“) vypočítává velikost a tvar otvoru protržení hráze, dobu vzniku a stanovuje hydrogram odtoku [17]. Model je fyzikálně založen na principech hydrauliky, transportu sedimentů, mechaniky zemin a také na geometrických a materiálových vlastnostech konstrukce hráze. Dále do něj vstupují parametry nádrže, jako jsou zásobní objem, charakteristika přelivu a časově závislá rychlost přítoku do nádrže. Kritickými materiálovými vlastnostmi zemích hrází jsou např. úhel vnitřního tření nebo průměrná velikost zrna (D_{50}). Tyto parametry lze dále použít v hydraulických modelech River Mechanics (např. FLDWAVE, SDB-J) k modelování odtoku z porušení a jeho průchodu řekou [18].

NWS vyvinulo nástroj JAVA GUI (BREACH GUI), který lze použít k vytvoření či načtení vstupního datového souboru a jeho spuštění v aplikaci BREACH. Ta zobrazí animaci tvorby protržení hráze a hydrogram protržení včetně výstupů z výpočtu v tabulkách [18].

V této diplomové práci byl ke stanovení hydrogramu ZPV použit nástroj BRCH v 1.00 z roku 2010.

5.1.2 HEC-RAS

Hydrologic Engineering Center – River Analysis Systém (dále jen „HEC-RAS) je volně dostupný softwarový prostředek vyvinutý pro modelování 1D a 2D proudění o volné hladině v přirozených nebo umělých korytech a přilehlých inundačních územích. Lze v něm modelovat nerovnoměrně ustálené, či neustálené proudění včetně proudění splavenin ve vodních tocích. Model může obsahovat také veškeré objekty ve sledovaném území, včetně mostních konstrukcí, propustků, jezů, spádových stupňů přehradních nádrží apod. HEC-RAS vyvíjí americká instituce Hydrologic Engineering Center (HEC), která je jednou z divizí Institute for Water Resources (IWR), U. S. Army Corps of Engineers [19].

Program HEC-RAS prochází neustálým vývojem a stále přidává nové funkce. Nejdůležitějším vylepšením posledních verzí programu je přidané prostředí RAS Mapper, které umožňuje úpravu a vytváření digitálních modelů území, práci s mapovými podklady a vrstvami nebo prezentaci výsledků ve formě animací průběhů hloubek a rychlostí v zájmovém území.

Současná verze tohoto softwarového prostředku HEC-RAS 6.1.0 byla použita ke stanovení rozlivu a průběhu zvláštní povodně pod VD Plumlov v této diplomové práci.

5.1.3 QGIS

QGIS je multiplatformní open source geografický informační systém (dále jen „GIS“). Software pod jménem QGIS vznikl v květnu 2002 a byl zřízen jako projekt na SourceForge v červnu téhož roku. Verze 1.00 pak byla vydána později v roce 2009. QGIS je vydán pod licencí GNU General Public License (GPL), což zjednodušeně znamená, že každý uživatel má přístup ke zdrojovému kódu, který může libovolně modifikovat a dále šířit. Mimo to umožňuje tato licence uživateli program využívat také ke komerčním účelům. Projekt QGIS si klade za cíl být uživatelsky příjemným geografickým informačním systémem, který je stejně funkční jako komerčně placené programy stejného typu např. ArcGIS. Také podporuje řadu rastrových i vektorových formátů s podporou vkládání pluginové architektury [20], [21].

V této diplomové práci byla pro práci s mapovými podklady a vrstvami použita verze programu QGIS 3.20.3 Odense.

5.2 Extrakce dat pro vytvoření DMT

Předtím, než je možné přistoupit k samotnému modelování proudění, je nezbytně nutné separovat z podkladových materiálů potřebná data a zadávací kritéria pro stanovený úsek vodního toku. Jedním ze základních podkladů, který je pro modelování zvláštní povodně naprosto nezbytný, je síť bodů digitálního modelu reliéfu 5. generace (dále jen „DMR 5G“), kterou lze ve stanoveném rozsahu v ČR získat objednávkou na portálu Českého úřadu zeměměřičského a katastrálního (dále jen „ČUZK“) [22]. Toto mračno bodů bylo nutné v mapovém editoru QGIS převést pomocí funkce TIN interpolace na tzv. TIN povrch, který lze uložit v rastrovém formátu jako stínovaný reliéf. Ten následně slouží k vytvoření digitálního modelu terénu (dále jen „DMT“), již v programu HEC-RAS. Pro modely proudění však takový čistý DMT nestačí, jelikož laserové skenování z letadel, které se v metodách pro vytváření sítě DMR 5G používá, neprohlédne hladinu vody v řekách a vodních nádržích, a tak nezobrazuje reálné parametry koryt vodních toků, ale pouze zachycuje ráz krajiny v přilehlém inundačním území. Z tohoto důvodu je potřeba

zpřesnit DMT informacemi o příčných profilech vodního toku ve sledované lokalitě. Tyto informace, konkrétně pro úsek vodního toku Hloučely a dále Valové [23] získané geodetickým zaměřením, byly poskytnuty Povodím Moravy, s. p. Výškové souřadnice příčných profilů a jejich umístění je nezbytné do digitálního modelu importovat a tzv. „vyříznout“. Tato operace je velmi časově náročná, jelikož je potřeba manuálně projít všechny příčné profily toku v editoru geometrických dat programu HEC-RAS. Ty byly dříve vytvořeny exportem souřadnic z příčných řezů a situačních výkresů. V tomto editoru geometrických dat je pak nutné upravit břehové linie toku, aby reflektovaly opravdový rozsah koryta toku a dále navazovaly na již zmíněný rastr získaný z DMR 5G. Je zde snaha, aby před finálním vyříznutím byly v co největší míře eliminovány nepřesnosti a koryto toku s inundačním územím na sebe správně navazovalo. Vytvořený finální DMT pak kombinuje přesnost geodetického zaměření vodního toku a reliéfu krajiny v inundačním území získaný z DMR 5G.

5.3 Stanovení hydrogramu protržení

V kapitole č. 5.1.1 bylo zmíněno, že pro stanovení hydrogramu protržení byla použita aplikace BREACH. Potřebné materiálové charakteristiky VD Plumlov a další zadávací údaje nutné k výpočtu a stanovení hydrogramu protržení hráze byly získány od společnosti VODNÍ DÍLA – TBD a. s. [24], případně byly obsaženy v manipulačním řádu VD [2]. Jednalo se např. o měrnou hmotnost materiálu těsnění a materiálu stabilizace, výškové úrovně koruny hráze a vodní hladiny (hloubka v čase T = 0) nebo definování přítoku do nádrže v čase při $PV_{10\,000}$. Počátek poruchy byl umístěn do místa, kde je drenážní potrubí, zmíněné v kapitole č. 3.4 (výšková úroveň 264,40 m n. m.). Nejdůležitější výsledné charakteristiky hydrogramu protržení VD Plumlov shrnuje tab. č. 14 a konečný hydrogram je uveden v příloze č. 1. Příloha č. 2 poté zachycuje objem povodňové vlny.

Tab. č. 14 Hlavní parametry výsledného hydrogramu ZPV a konečná velikost otvoru

Doba vzestupné větve ZPV	Kulminační průtok	Objem odtoku vody do konce simulace	Šířka otvoru v koruně při kulminaci	Konečná výška otvoru	Kóta dna otvoru na konci simulace
[min]	[m^3/s]	[mil. m^3]	[m]	[m]	[m n. m.]
49,2	2144,28	24,97	12,91	14,69	263,95

5.4 Modelování proudění

Jak je již zmíněno v kapitole č. 5.1.2, k numerickému řešení matematického modelu v této diplomové práci byl použit program HEC-RAS ve verzi 6.1.0. Tento program ke svým kalkulacím využívá metodu konečných diferencí. Co se týče nastavení výpočtové sady rovnic

pro modelování ve 2D, HEC-RAS má integrované rovnice SWE, které byly matematicky definovány v kapitole č. 4 a také byly při modelování nastaveny a použity. Vytipovaný úsek vodního toku v zájmovém území měří od VD Plumlov k soutoku řek Valové a Moravy celkem asi 27,5 ř. km.

Na vodním toku Hloučely i Valové se objevují různé objekty, které oba toky kříží nebo v nich vzdouvají vodu. Spádové stupně i jezové konstrukce byly při modelování v rámci ZPV zanedbány, stejně jako přítoky, ke kterým nebyl získán dostatek platných dat. Silniční a železniční mosty však byly v modelu obsaženy a do výpočtu zakomponovány. Program HEC-RAS k těmto mostním objektům umí i ve 2D po zadání základních geometrických údajů vytvořit sadu měrných křivek. Tyto křivky následně používá k získání rozdílu hladin vody při jejím průchodu mostem i přes něj, a to pro každou sadu buněk, které se k modelování mostu používají. Tento rozdíl hladin následně přepočítává na sílu, která je rozdělena a vložena do speciální verze rovnice hybnosti pro každou sadu buněk překlenujících střednici mostu. Poté jsou 2D rovnice vyřešeny stejně, jako v libovolných jiných buňkách daného modelu. Tento přístup používaný pro 2D modelování mostních objektů umožňuje vypočítat ekvivalentní síly pro nízký průtok, tlakový průtok mostem nebo i kombinaci průtoku mostem a průtoku při jeho přelévání [19].

Celkem byly v modelu obsaženy 3 železniční a 22 silničních mostních konstrukcí, které významnou měrou ovlivňují výsledný výstup. Celková délka simulace ZPV byla 49 hodin s výpočtovým časovým krokem 0,3 sekundy. Výpočtová síť tzv. „mesh“ měla nastavenou výchozí velikost výpočtové jednotky 20 × 20 m s místním zjemněním uvnitř a kolem koryta řeky a u mostních objektů (10 × 10 m nebo až 5 × 5 m).

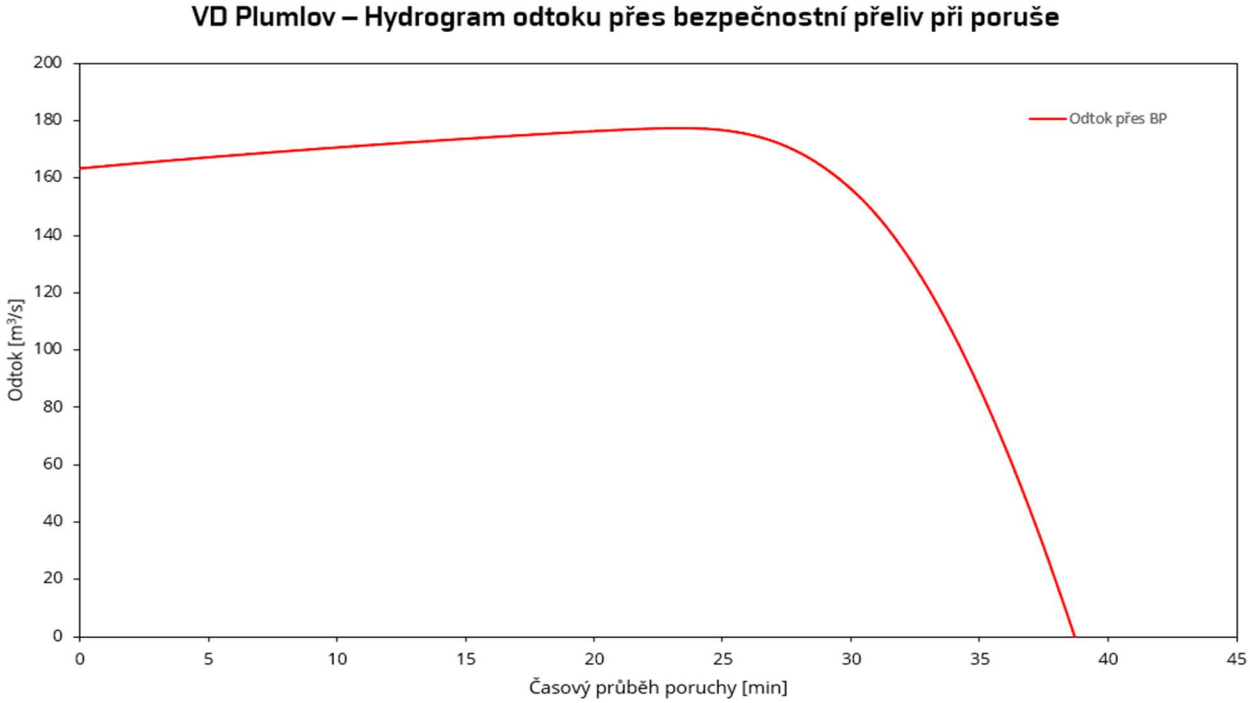
5.4.1 Definice varianty řešení ZPV a popis modelu

Modelování proudění ZPV bylo provedeno pro tuto variantu:

- Průlomová vlna + extrémní povodeň (ZPV 1 + $PV_{10\,000}$)
- Okrajová podmínka na začátku modelu -> výsledný hydrogram protržení (uveden v příloze č. 1)
- Okrajová podmínka na konci modelu -> uvažován podélný sklon dna v korytě řeky Valové na konci zájmového úseku

Pro zlepšení komplexnosti modelu, a vzhledem k možnosti různého umístění horních okrajových podmínek, byl v matematické simulaci výsledný hydrogram celkového odtoku při poruše hráze rozdělen na hydrogram odtoku v místě porušení (kde je také v modelu umístěn) a hydrogram odtoku přes bezpečnostní přeliv (BP), než hladina v nádrži v důsledku poškození hráze poklesne pod jeho výškovou úroveň (tato okrajová podmínka

je v modelu umístěna v prvním profilu řeky Hloučely). Je třeba zdůraznit, že grafické znázornění odtoku přes bezpečnostní přeliv, které je zachyceno na obr. č. 6 nezobrazuje vzestupnou větev hydrogramu od hodnoty 0 m^3/s, protože provedená simulace začíná v čase T = 0 již na maximální hladině v nádrži na kótě 277,62 m n. m., kdy přes přeliv už v realitě za povodně přepadá paprsek vody o mocnosti necelých 1,2 m. Od začátku simulace v čase T = 0 trvá pouze necelých 40 minut, než hladina vody v nádrži klesne pod kótu bezpečnostního přelivu a všechen odtok z nádrže dále prochází pouze místem porušení hráze (při zanedbání odtoku objektem spodních výpustí).



Obr. č. 6 Grafické zobrazení odtoku přes BP v čase simulace T = 0 a dále

Naprosto zásadní roli při modelování proudění vody v otevřených korytech má určení hodnoty drsnostního součinitele dle Manninga, který reprezentuje hydraulickou drsnost povrchu, kde voda v zájmovém území protéká. V modelech zvláštních povodní je efekt hydraulické drsnosti o to silnější, že kromě koryta řeky se voda šíří i v prostředí, kde se běžně v takové vysoké míře (hloubce) nevyskytuje, např. mezi domy městské zástavby, na polích nebo v lesích apod. V každém modelu je tak nutné přejít k jistým zjednodušením, ta ovšem nejsou u kalkulace modelu ve 2D zdaleka tak drastická, jako to je u modelů v 1D (podrobně popsáno ve zdroji [1]). Co se týče možnosti přiřazení jednotlivým typům povrchů v zájmovém území správný Manningův součinitel, k tomu slouží v programu HEC-RAS vytvoření speciální mapové vrstvy nazvané „Land Cover“, která má v atributové tabulce ke každému typu povrchu určený součinitel n a ten umí při výpočtu

zohlednit a zahrnout. Pro vytvoření této vrstvy je však třeba mít podklad typu mapových polohopisných vrstev Zabaged, jejichž pořízení nebylo v důsledku vysoké ceny možné, a to i v malém rozsahu mapových listů. V této diplomové práci byly proto pro účel vytvoření vrstvy „Land Cover", která představuje mapu drsností využity volně dostupná data OpenStreetMap [25]. Jednotlivé polygony mapových vrstev v těchto podkladech byly v QGISu upraveny, případně dle potřeb dokresleny a následně ve finální podobě importovány do HEC-RASu, kde bylo možné přiřadit Manningovy součinitele a propojit vytvořenou vrstvu s modelem a DMT. Použité drsnostní součinitele shrnuje tab. č. 15.

Tab. č. 15 Souhrn použitých součinitelů drsnosti *n* dle Manninga

Typ prostředí (povrchu), kterým prochází ZPV	Hodnota Manningova součinitele *n* [–]
Budovy a bloky budov	10
Rezidenční a městské plochy	0,14
Zemědělské plochy	0,08
Průmyslové areály a plochy	0,25
Parky, sady, okrasné zahrady	0,18
Parkoviště, cyklostezky	0,05
Lesní porost	0,2
Železnice, lesní a polní cesty	0,08
Koryta řek	0,03
Vodní plochy	0,035
Křovinatý porost	0,15
Silnice	0,025
Hřbitov	0,15
Trvalý travní porost, louky	0,06
Neurčené plochy	0,08

5.5 Popis území zasaženého ZPV

Kompletní území zasažené, a tudíž ohrožené zvláštní povodní pod VD Plumlov, zachycuje příloha č. 3 různými odstíny modré barvy dle maximální hloubky vodního sloupce v kulminaci v daném místě. V zasažené oblasti zájmového území je nutno očekávat škody na korytě toku, v silniční a železniční infrastruktuře měst a obcí, na budovách, parcelách a jiném majetku lidí a v průmyslových areálech. Je zde předpoklad, že čas k varování obyvatelstva před nebezpečím a k jeho evakuaci bude velmi krátký. Čím kratší tento časový úsek je, tím je ohrožení vyšší.

Dle výsledků simulací dosahuje povodňová vlna nejvyšších hloubek a rychlostí proudění v prvních kilometrech pod Plumlovskou přehradou, kde je údolí kolem řeky Hloučely ještě poměrně sevřené. V obci Mostkovice v detailu PF 1 (příloha č. 4), který je od VD Plumlov vzdálený 1,43 km vlna kulminuje v čase 143 minut po začátku simulace. Maximální hloubka při kulminačním průtoku 1480,27 m^3/s tímto profilem činí 5,95 m. Lze předpokládat, že část obce Stichovice a obec Mostkovice by byly naprosto zničené destruktivními účinky povodňové vlny šířící se maximální rychlostí až 5,2 m/s.

Rozliv vlny se za obcí Mostkovice s postupným rozevíráním údolí kolem toku Hloučely značně rozšiřuje, a to hlavně na jih od řeky. Zasažené jsou dle modelu obce Čechovice a Krasice. Vlna postupně míří na předměstí Prostějova a šíří se dále celým městem, kde značně zpomaluje svůj průběh průchodem městskou zástavbou nebo průmyslovými areály a zbrzdí se i o násypy dálnice D46. Částečně zatopena je i obec Držovice směrem severně od Prostějova.

Po průchodu vlny Prostějovem se dále kolem řeky Valové vlna blíží k obci Kralice na Hané, kterou ale z velké části míjí. V detailním profilu PF 2 (příloha č. 5) vlna dosahuje kulminace v čase 8 hodin 16 minut. Tento časový údaj slouží jako dobrý ukazatel zpomalení šíření vlny v městě Prostějově. Rychlost proudění i kulminační průtok tímto profilem je pak výrazně nižší než v profilu PF 1. Šířka rozlivu se také díky charakteru území opět zmenšuje a při dalším průchodu lokalitou kolem řeky Valové již zůstává poměrně konstantní.

V místech od profilu PF 2 až k profilu PF 4 (příloha č. 7) se vlna rozlévá hlavně přes zemědělské plochy a ve většině rozlivu prochází mimo zastavěná území obcí. Profil PF 4 situovaný před obcí Uhřice charakterizují hodnoty kulminačního průtoku 142,97 m^3/s a maximální hloubka 4,07 m.

Modelování bylo ukončeno soutokem řek Valová a Morava, ale modře vyznačená zátopa v místech vedle obce Uhřice na mapovém podkladu v příloze č. 3 nekončí, jelikož pouze skončil úsek s vyříznutým korytem řeky, ale DMT pokračuje až před město Kojetín, kde je vyznačen PF 5 (příloha č. 8; zde končí veškerý získaný podklad). Vlna samozřejmě pokračuje v šíření až do Kojetína a dále, ale k řece Moravě nebyly získány parametry koryta ani hydrologické údaje, a proto dále nelze považovat výsledky za relevantní (včetně PF 5, který je zobrazen pouze pro ilustraci). Navíc lze očekávat, že pokud by probíhala povodeň i na řece Moravě, docházelo by na toku Valové ke zpětnému vzdutí hladiny a rozliv by se směrem proti toku řeky Valové ještě změnil. Toto ovšem nebylo možné v této diplomové práci zachytit. Bylo by potřeba celou zájmovou lokalitu značně rozšířit a situaci

v povodí řešit mnohem komplexněji. Je také třeba dodat, že na studovaném úseku řek Hloučely a Valové se povodňový průtok ZPV netransformuje na Q_{100} a model byl zkrácen i oproti původnímu zadání.

Pro všechny grafické přílohy (č. 3 až č. 8) byla jako podkladová mapa použita základní mapa ČR v měřítku 1:25 000 dostupná na webu ČUZK [26]. Jednotlivé charakteristiky ZPV v detailních profilech zobrazených v přílohách č. 4 až č. 8 zachycuje tabulka v příloze č. 9.

6 ZÁVĚR

V této diplomové práci byl zpracován pravděpodobný scénář poškození a selhání VD Plumlov modelováním průchodu kontrolní povodňové vlny územím pod dílem. Je třeba zdůraznit, že v případě, že by se podobný nebo stejný scénář průběhu ZPV realizoval, bylo by bezpodmínečně nutné okamžitě evakuovat obyvatele Mostkovic a velké části Prostějova mimo zasažené území.

Matematické modelování průběhu ZPV a stanovení rozlivu zvláštní povodně pod VD Plumlov je zatíženo nutnými zjednodušujícími předpoklady a nejistotami, které vycházejí z podkladů v modelu použitých. To způsobuje možné snížení přesnosti výsledků simulace. Tato zjednodušení jsou však při modelování nutná a jsou zohledněna v předpokladech řešení a v provedené schematizaci.

Oproti zjednodušení stejného problému při řešení v 1D (jako v bakalářské práci [1]) má však modelování ve 2D několik významných výhod. Existuje předpoklad, že se voda po přelití nebo protržení hráze bude pohybovat různými směry a s různými rychlostmi, což není v 1D modelu možné zachytit, ale modelování ve 2D to umožňuje. Dále je také možné zájmovému území přiřadit téměř neomezený počet hydraulických drsností povrchů dle Manninga, takže je pomocí tohoto parametru lépe definované než v 1D. V uživatelském návodu k programu HEC-RAS [19] se také uvádí doporučení, počítat rozlivy v širokých a plochých územích ve kterých navíc není známa předem tzv. „flow path“ (volně přeloženo „cesta proudu“) pomocí 2D, jelikož používaná soustava rovnic SWE je k tomu určena a zaručuje přesnější výsledky než výpočet v 1D [19].

Pořád je však nezbytné brát výstupy této diplomové práce s určitou rezervou, jelikož detaily časových parametrů ZPV, včetně jejího průběhu nebo stanovené ohrožené území, se mohou v realitě na základě různých okolností lišit. I přesto však je výstup této práce považován za dostatečně přesný a vypovídající pro předpokládaný účel použití.

7 LITERATURA A ELEKTRONICKÉ ZDROJE

[1] Karel Pekárek *Stanovení území ohroženého zvláštní povodní pod VD Šance.* Brno, 2019. 46 s., 5 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Jandora, Ph.D.

[2] JUŘÍČKOVÁ, Michaela. *Manipulační řád pro vodní dílo Plumlov na řece Hloučele v km 9,700*. Brno: Povodí Moravy, s. p., červen 2019.

[3] DRAHOŠ, Milan. *VD Plumlov: Program TBD pro trvalý provoz*. Brno: VODNÍ DÍLA – TBD, a. s., listopad 2013.

[4] *Povodí Moravy: Závod Horní Morava* [online]. Povodí Moravy, s. p., ©2010–2021 [cit. 2021-12-25]. Dostupné z: http://www.pmo.cz/images/text/mapka-pm-prehled-zhm-.jpg

[5] *Povodí Moravy: VD Plumlov* [online]. Povodí Moravy, s. p., říjen 2019 [cit. 2021-12-25]. Dostupné z: http://www.pmo.cz/cz/o-podniku/vodni-dila/plumlov/

[6] VYSLOUŽIL, Zdeněk. Plumlovská přehrada (3. 6. 2021). *Prostějovský Deník.cz: Plumlovská přehrada se plní, ale pomalu. Není voda.* [online]. Prostějovský Deník.cz, 2021, 14. 6. 2021 [cit. 2021-12-25]. Dostupné z: https://g.denik.cz/59/fa/mostkovice-prehrada-vypust-prace-2021-02.jpg

[7] Česká republika. Vyhláška MZE č. 471/2001 o technickobezpečnostním dohledu nad vodními díly. Dostupná z: https://www.zakonyprolidi.cz/print/cs/2001-471/zneni-20100902.htm?sil=1

[8] Česká republika. Vyhláška č. 367/2005 Sb., kterou se mění vyhláška č. 590/2002 Sb. o technických požadavcích pro vodní díla. Dostupná z: https://www.zakonyprolidi.cz/print/cs/2005-367/zneni-20051101.htm?sil=1

[9] Pohled pod hladinu: Plumlovská přehrada. *MRK.cz: Stále na rybách* [online]. 29. 10. 2014 [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: https://www.mrk.cz/images/clanky/pmo/plumlov/01big.jpg

[10] Plumlov: Mapy zobrazující hloubku dna v jednotlivých nádržích. Mapový podklad ©ČÚZK. *Povodí Moravy: Zobrazení hloubky nádrží* [online]. [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: http://www.pmo.cz/download/plumlov.pdf

[11] DONTH, Petr. *Řeka Hloučela: Neolit a eneolit*. Olomouc, 2016. Semestrální práce z předmětu Neolit a eneolit. Univerzita Palackého v Olomouci, Filozofická fakulta, Katedra historie.

[12] ČSN 75 1400. *Hydrologické údaje povrchových vod*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

[13] Metodický pokyn odboru ochrany vod MŽP pro zpracování plánu ochrany území pod vodním dílem před zvláštní povodní. *Věstník & Zpravodaj MŽP: Metodické pokyny a návrhy*. 2005, XV(9), str. 77-90. ISSN 0862-9013.

[14] Česká republika. Zákon č. 240/2000 Sb., o krizovém řízení a o změně některých zákonů. In: *Sbírka zákonů České republiky*. Dostupný také z: https://www.zakonyprolidi.cz/print/cs/2000-240/zneni-20170801.htm?sil=1

[15] MIDDLEBROOKS, Thomas Alwyn. *Earth-Dam Practice in the United States.* Centennial Transactions. ASCE, 1952, (Paper No. 2620), pp. 697-722.

[16] JANDORA, Jan. *Matematické modelování ve vodním hospodářství: Modul 01 – Studijní opora pro studijní programy s kombinovanou formou studia*. Brno: FAST VUT, 2008.

[17] FREAD, D.L. *BREACH: An Erosion Model for Earthen Dam Failures* [online]. Silver Spring, Maryland: National Weather Service, 1991 [cit. 2022-01-04]. Dostupné z: https://www.rivermechanics.net/images/models/breach.pdf

[18] SYLVESTRE, Janice & Paul. *User´s Guide for BRCH GUI (BRCH-J)* [online]. 2018 [cit. 2022-01-04]. Dostupné z: https://rivermechanics.net/images/models/BRCH%20GUI%20Users%20Guide.pdf

[19] BRUNNER, Gary W. *HEC-RAS River Analysis System: 2D Modeling User´s Manual (Version 6.0)* [online]. California, 2021 [cit. 2022-01-04]. Dostupné z: https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_6.0_2D_Modeling_Users_Manual.pdf

[20] QGIS Development Team. *QGIS: User Guide.* [online]. ©2022 [cit. 2022-01-04]. Dostupné z: https://docs.qgis.org/3.16/en/docs/user_manual/

[21] *Školení QGIS pro začátečníky: Úvod* [online]. GISMentors, ©2021 [cit. 2022-01-04]. Dostupné z: https://training.gismentors.eu/qgis-zacatecnik/

[22] Digitální model reliéfu ČR 5. generace, poskytnutý v rámci zapůjčení dat pro studentské účely a doplněný objednávkou na fyzickou osobu studenta; Prohlížecí služba WMS – DMR 5G dostupná z: https://geoportal.cuzk.cz/geoprohlizec/default.aspx?wmcid=11273

[23] Příčné a podélné profily toků Hloučely a Valové (úsek od VD Plumlov až po soutok řek Valové a Moravy), Povodí Moravy, s. p., Brno, 2010.

[24] Parametry hráze VD Plumlov nutné pro stanovení ZPV v programu BRCH (1.00), VODNÍ DÍLA – TBD, a. s., Brno, 2013.

[25] OpenStreetMap data for this region: Czech Republic (czech-republic-latest-free.shp.zip) [online]. 2021 Dostupné z: https://download.geofabrik.de/europe/czech-republic.html

[26] Základní Mapa 1: 25 000. *ČUZK: Geoportál* [online]. ©2010 [cit. 2022-01-04]. Dostupné z: https://geoportal.cuzk.cz/WMS_ZM25_PUB/WMService.aspx

8 SEZNAM ZKRATEK A SEZNAM VELIČIN

8.1 Seznam zkratek

VD	Vodní dílo
PV	Povodňová vlna
BP	Bezpečnostní přeliv
ZPV	Zvláštní povodňová vlna
MVE	Malá vodní elektrárna
ČSN	Česká technická norma
TBD	Technickobezpečnostní dohled
ČHMU	Český hydrometeorologický ústav
ČUZK	Český úřad zeměměřičský a katastrální
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
MZE	Ministerstvo zemědělství
DMR 5G	Digitální model reliéfu 5. generace
DMT	Digitální model terénu
HEC	Hydrologic Engineering Center
IWR	Institute for Water Resources
USACE	U. S. Army Corps of Engineers
GIS	Geografický informační systém
GPL	General Public License

8.2 Seznam symbolů a veličin

H_s	hladina stálého nadržení	[m n. m.]
H_z	maximální zásobní hladina	[m n. m.]
H_{max}	maximální hladina v nádrži	[m n. m.]
MQ	minimální zůstatkový průtok	[l/s]
Q	průtok	[m^3/s]
P	výkon	[kW]
A	plocha	[km^2]
V	objem	[m^3]
Q_a	průměrný dlouhodobý roční průtok	[m^3/s]
q_a	průměrný roční specifický odtok	[l/s/km^2]
Hs	průměrný roční úhrn srážek	[mm]

Q_m	*m*–denní průtok	[m^3/s]
Q_N	*N*–letý průtok	[m^3/s]
W_{PVN}	objem *N*–leté povodňové vlny	[mil. m^3]
T	čas	[s]
p	tlak	[Pa]
τ	smykové napětí	[Pa]
h	hloubka	[m]
g	tíhové zrychlení	[m/s^2]
f	Coriolisův parametr	[-]
Ω	úhlová rychlost otáčení země	[rad/s]
Φ	zeměpisná šířka	[-]
c_f	koeficient tření na dně	[-]
J_d	průměrný sklon dna	[-]
C	Chézyho rychlostní součinitel	[$m^{0,5}/s$]
n	součinitel drsnosti dle Manninga	[-]
R	hydraulický poloměr	[m]
c_s	koeficient tření na hladině	[-]
ψ	úhel mezi směrem větru a kladným směrem osy x	[°]
ρ_a	hustota vzduchu	[kg/m]
W	charakteristická rychlost větru u hladiny	[m/s]

9 SEZNAM TABULEK

Tab. č. 1 Požadovaná míra bezpečnosti vodních děl při povodni [8] 6

Tab. č. 2 Technické parametry hráze [2], [3] 8

Tab. č. 3 Prostor stálého nadržení [3] 9

Tab. č. 4 Prostor zásobní [3] 10

Tab. č. 5 Prostor retenční ovladatelný [3] 10

Tab. č. 6 Prostor retenční neovladatelný [3] 10

Tab. č. 7 Celkový prostor nádrže [3] 10

Tab. č. 8 Parametry bezpečnostního přelivu [2], [5] 11

Tab. č. 9 *m*–denní průtoky [2] 14

Tab. č. 10 *N*–leté průtoky [2] 14

Tab. č. 11 Výsledné hodnoty metod pro zjištění parametrů $KPV_{10\,000}$ [2] 15

Tab. č. 12 Příčiny poškození sypaných hrází v USA mezi lety 1850 až 1950 [15] 17

Tab. č. 13 Stáří vodních děl v době kritické poruchy [15] 17

Tab. č. 14 Hlavní parametry výsledného hydrogramu ZPV a konečná velikost otvoru 28

Tab. č. 15 Souhrn použitých součinitelů drsnosti *n* dle Manninga 31

10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. č. 1 Mapa zvýrazňující závod Horní Morava a s označením zájmové lokality [4] 4

Obr. č. 2 Pohled na věžový výpustný objekt a korunu hráze [6] 7

Obr. č. 3 Letecký snímek zátopy přehradní nádrže [9] 8

Obr. č. 4 Zobrazení hloubek v nádrži v závislosti na nadmořské výšce hladiny [10] 9

Obr. č. 5 Výřez proudu kapaliny [16] 19

Obr. č. 6 Grafické zobrazení odtoku přes BP v čase simulace $T = 0$ a dále 30

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 Hydrogram protržení VD Plumlov

Příloha č. 2 Objem odtoku při protržení VD Plumlov

Příloha č. 3 Plocha rozlivu ZPV

Příloha č. 4 Detail PF 1

Příloha č. 5 Detail PF 2

Příloha č. 6 Detail PF 3

Příloha č. 7 Detail PF 4

Příloha č. 8 Detail PF 5

Příloha č. 9 Souhrnná tabulka veličin ZPV