



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

ZANÁŠENÍ NÁDRŽE VD NOVÉ HEŘMINOVY

SEDIMENT DEPOSITION IN RESERVOIR OF NOVÉ HEŘMINOVY DAM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAN KAMMERMAYER

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ZBYNĚK ZACHOVAL, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Jan Kammermayer
Název	Zanášení nádrže VD Nové Heřminovy
Vedoucí práce	doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Digitální model terénu a hydrologická data.

Morris G. L., Fan, J., 1998. Reservoir sedimentation handbook. New York: McGraw-Hill.

García, M. H., 2008. Sedimentation engineering. Processes, Measurements, Modeling and Practice. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110. Reston: ASCE.

Bačík, M., Kališ, J., Klíčovská, J., 1985. Modelovanie zanášania nádrží. Bratislava: VÚVH Bratislava.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Pojednání o zanášení nádrží.

Popis návrhu umělého transportu splavenin přes VD Nové Heřminovy.

1D numerický model transportu splavenin pro případ s umělým transportem a bez umělého transportu splavenin.

Vyhodnocení rychlosti zanášení VD pro oba případy.

Zhodnocení obou případů.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá zanášením vodní nádrže Nové Heřminovy. Popisuje návrh umělého transportu a vyhodnocuje jeho účinnost. Pro stanovení průtoku splavenin do nádrže uvádí použití částečně kalibrovaného jednorozměrného numerického modelu transportu splavenin s deformací dna zhotoveného v programu HEC-RAS. Zanášení nádrže stanovuje dvěma metodami, jejichž výsledky porovnává a uvádí jejich omezení. Zanášení nádrže vyhodnocuje formou změny objemu zásobního prostoru nádrže v čase.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zanášení vodní nádrže, jednorozměrný numerický model, HEC-RAS, splaveniny, umělý transport, rychlost zanášení, vodní dílo Nové Heřminovy, doba životnosti nádrže

ABSTRACT

The thesis deals with silting of water reservoir Nové Heřminovy. There's describe design of artificial traffic and evaluate its effectiveness. To determine the flow of sediment into the reservoir with use a partially calibrated one-dimensional numerical model of sediment transport with deformation of bed is made in software HEC-RAS. Silting reservoirs is assessment with two methods, the results are compared and describes their limitations. Reservoirs silting evaluates through volume changes in reservoir storage in time.

KEYWORDS

Silting water reservoir, one-dimensional numerical model, HEC-RAS, sediments, artificial transport, silting speed, water construction Nové Heřminovy, reservoir life

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Jan Kammermayer *Zanášení nádrže VD Nové Heřminovy*. Brno, 2016. 82 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2017

Bc. Jan Kammermayer
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Zbyňku Zachovalovi, Ph.D., za jeho přístup, trpělivost a odborné rady při konzultacích. Dále mým rodičům, sestře, přítelkyni a dalším za jejich podporu při studiu a psaní této práce. V neposlední řadě také firmě AQUATIS a. s. za poskytnutá data se svolením Povodí Odry, s. p.

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	POPIS ZÁJMOVÉ LOKALITY	11
2.1	Správní údaje	11
2.2	Správce toku	11
2.3	Popis toku a lokality	13
2.4	Geologické a pedologické poměry	14
2.5	Hydrologické poměry	15
2.6	Klimatické poměry	16
2.7	VD Nové Heřminovy.....	17
2.8	Splaveninový režim řeky Opavy	18
3	TEORETICKÝ ZÁKLAD	19
3.1	Zrnitost	19
3.2	Pórovitost usazenin	20
3.3	Hustota a viskozita	21
3.4	Základní dělení částic v proudu.....	21
3.5	Splaveniny	22
3.5.1	Plaveniny	23
3.5.2	Dnové splaveniny.....	23
3.6	Vývoj krycí vrstvy	24
3.7	Smykové napětí v rovnoměrném proudu.....	25
3.8	Počátek pohybu splavenin.....	26
3.8.1	Výpočet počátku pohybu splavenin	26
3.9	Výpočet proudění vody	28
3.10	Výpočet proudění splavenin.....	30
3.11	Usazování částic	31
4	ZANÁŠENÍ NÁDRŽÍ	33
4.1	Transport sedimentů	33
4.2	Opatření proti zanášení nádrží	39
5	UMĚLÝ TRANSPORT SPLAVENIN PŘES VD NOVÉ HEŘMINOVY.....	41
5.1	Usazovací prostor splavenin.....	41
6	1D MODEL TRANSPORTU SPLAVENIN.....	43
6.1	HEC-RAS.....	43

6.2	Vstupní data a podklady.....	43
6.3	Modul transportu sedimentů	49
6.4	Sedimentační data a možnosti nastavení.....	50
6.5	Model stávajícího stavu	53
6.5.1	Kalibrace a testy modelu.....	54
6.5.2	Kalibrace a testy hydrodynamického modelu.....	55
6.6	Model bez umělého transportu splavenin	62
6.7	Model s umělým transportem splavenin.....	62
6.8	Výstupní data	62
6.8.1	Průměrný roční průtok splavenin.....	62
6.8.2	Zanášení nádrže.....	63
7	ZANÁŠENÍ NÁDRŽE POMOCÍ BRUNEOHO KŘIVKY	65
8	ZHODNOCENÍ OBOU VARIANT DLE BRUNEOHO KŘIVKY.....	67
8.1	Varianta BUP	67
8.2	Varianta SUP	68
9	POROVNÁNÍ ZANÁŠENÍ NÁDRŽÍ	69
9.1	Porovnání variant BUP a SUP	69
9.2	Porovnání varianty BUP a BUP-H.....	70
10	ZÁVĚR.....	72
11	SEZNAMY	74
11.1	Seznam použitých symbolů.....	74
11.2	Seznam zkratk	77
11.3	Seznam použité literatury.....	78
11.4	Seznam tabulek	80
11.5	Seznam obrázků.....	80

1 ÚVOD

Výstavba nové nádrže má zásadní vliv na splaveninový režim toku. Po výstavbě začnou splaveniny vnikat do nádrže. Usazování splavenin v nádrži má zásadní vliv na její funkčnost. Největším problémem spojeným se zanášáním je zkracování životnosti nádrže (zmenšování objemu nádrže). Predikce časového vývoje zanášení nádrže je proto nezbytná pro stanovení životnosti nádrže. Zamezit zanášení nádrže lze vhodnými opatřeními. Na druhou stranu zabránit přirozenému chodu splavenin vede k diskontinuitě splavenin a v prostoru pod hrází nádrže dochází ke vzniku hladové vody.

Diplomová práce se zabývá zanášáním vodního díla (VD) Nové Heřminovy. Pro transport splavenin přes VD Nové Heřminovy je navržen umělý transport splavenin.

Pro výpočet transportu splavenin je použit vhodný 1D program, ve kterém je vytvořen numerický model stávajícího stavu řeky Opavy. Model je následně kalibrován a testován na různé podmínky. Dále je vytvořen model transportu splavenin pro případ bez a s umělým transportem splavenin. Pro oba případy je provedeno vyhodnocení rychlosti zanášení nádrže.

Výstupem práce jsou hodnoty průtoku splavenin ve zvolených variantách vypočítané pomocí vhodného programu a stanovená životnost nádrže.

2 POPIS ZÁJMOVÉ LOKALITY

2.1 Správní údaje

Správní údaje zájmové lokality jsou:

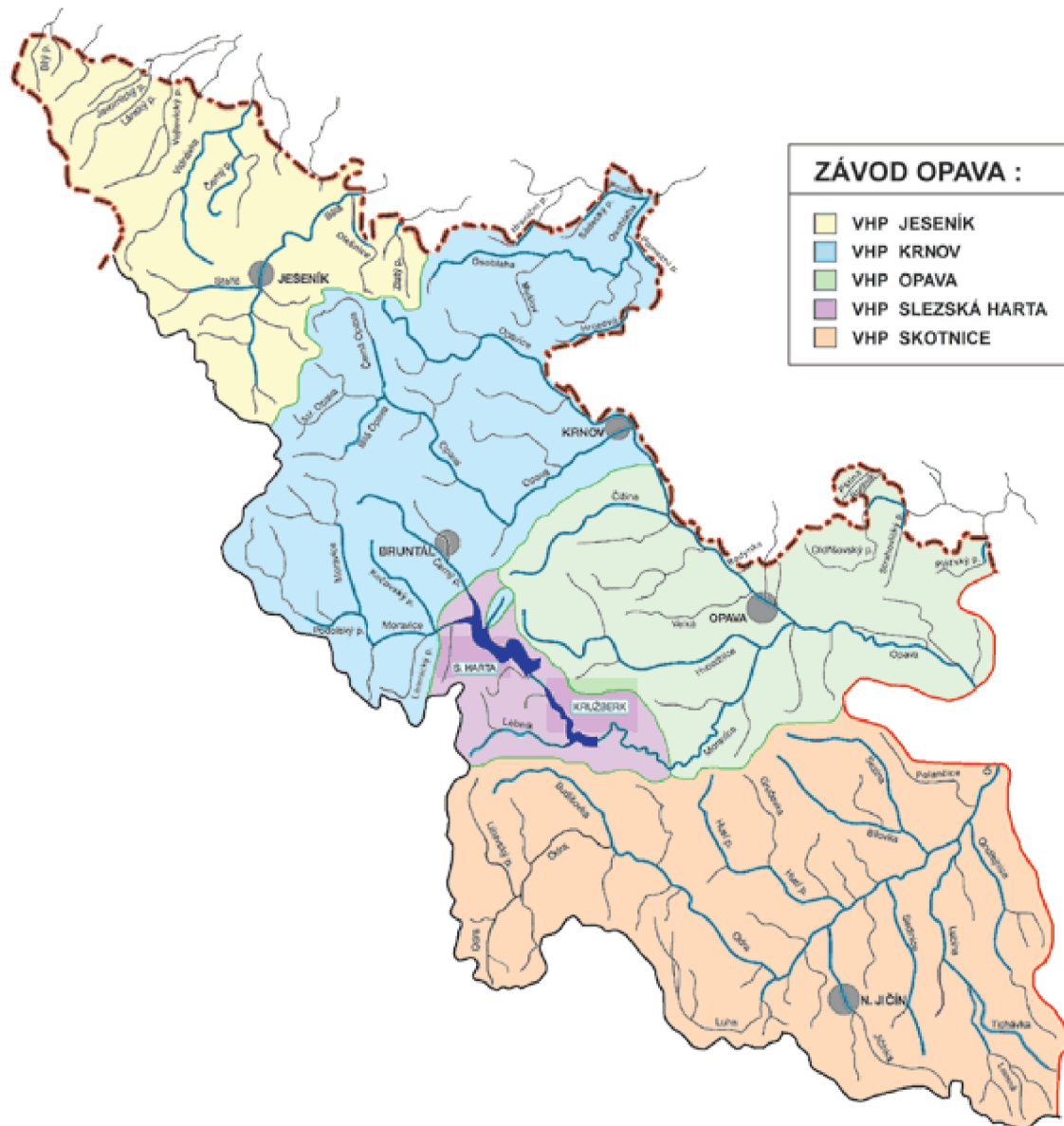
Tok:	Opava
ID toku:	10 100 014
Celková délka toku:	109,3 km (od soutoku ve Vrbně pod Pradědem)
Kraj:	Moravskoslezský kraj
Okres:	Bruntál
Katastrální území:	Nové Heřminovy
Správce toku:	Povodí Odry, s. p. – Závod Opava
Číslo vodohospodářské mapy:	15-31
Číslo hydrologického pořadí [8]:	2-02-01



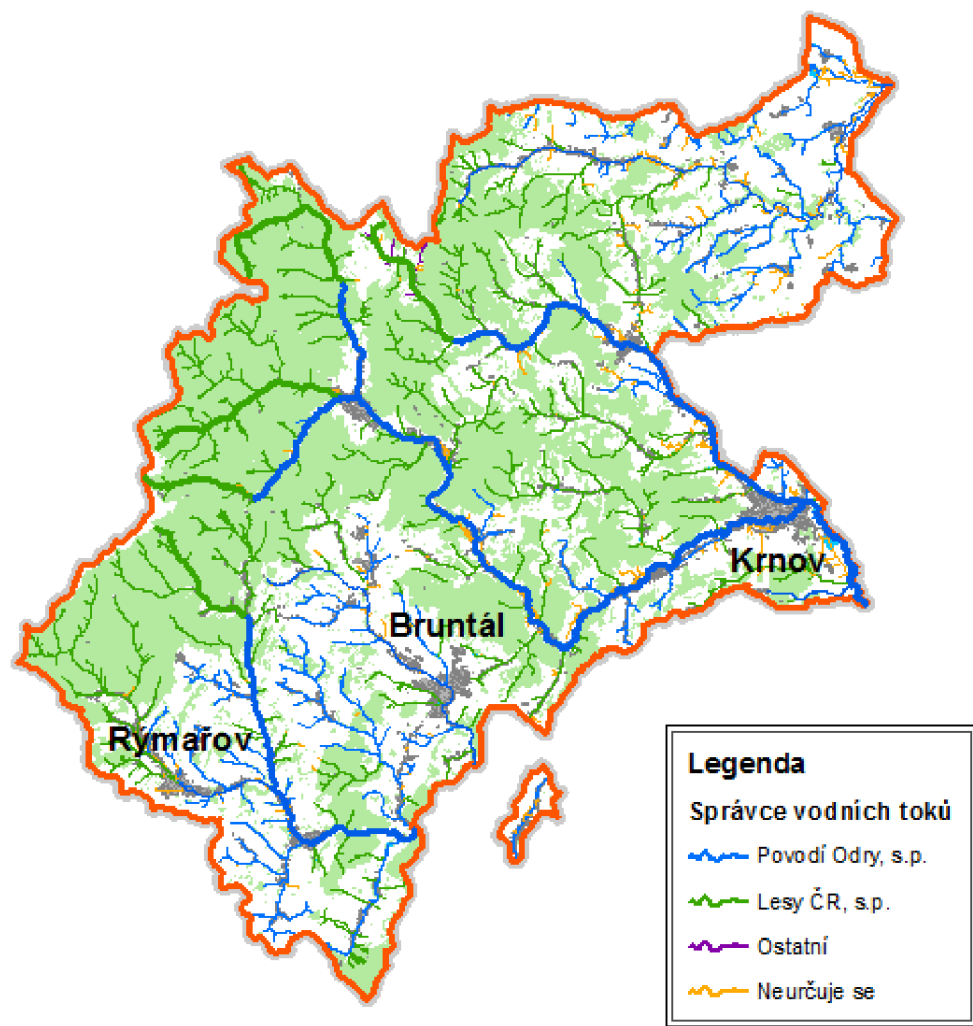
Obr. 2.1 Přehledná mapa největších řek v ČR [18]

2.2 Správce toku

Správce toku je Povodí Odry, s. p., který vznikl 1. ledna 2001. O zájmový úsek se stará vodohospodářský provoz (VHP) Krnov, spadající pod Závod Opava [15].



Obr. 2.2 Územní působnost Závodu Opava [15]

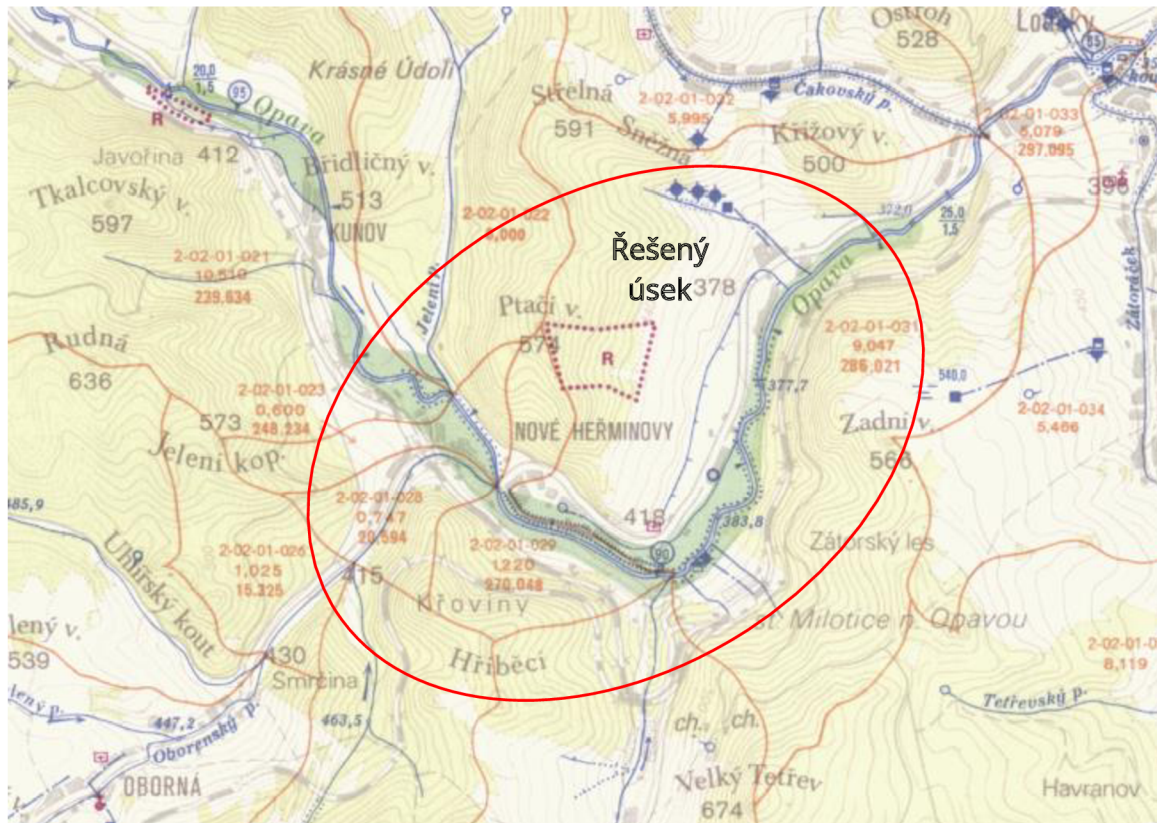


Obr. 2.3 Území VHP Krnov [15]

2.3 Popis toku a lokality

Řeka Opava je v dílčím povodí Odry (Horní). Vzniká soutokem Střední, Černé a Bílé Opavy u Vrbna pod Pradědem. Střední Opava pramení na severovýchodních svazích Pradědu. Černá Opava pramení na severozápadních svazích Orlíku a Bílá Opava na svazích Pradědu.

Posuzovaná část toku se nachází v oblasti katastrálního území Nové Heřminovy, které má rozlohu 11,03 km². Obec Nové Heřminovy leží 4 km severovýchodně od města Bruntál v nadmořské výšce 392 m n. m. a žije zde přibližně kolem 262 obyvatel [17].

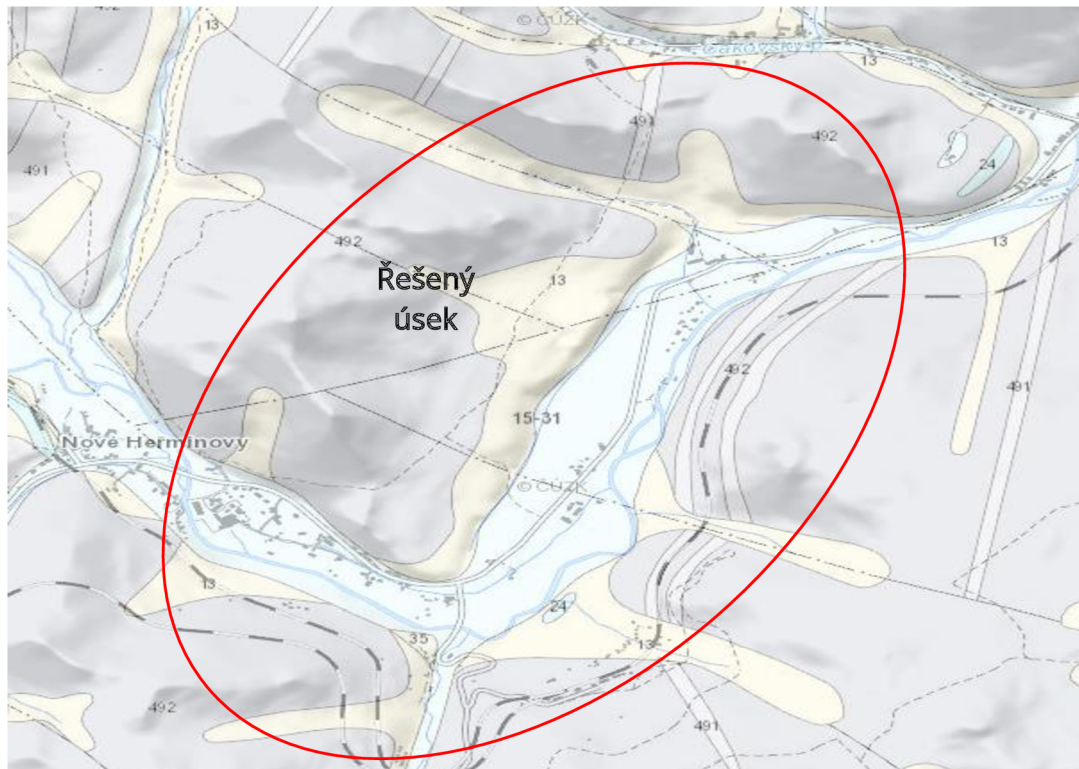


Obr. 2.4 Vodohospodářská mapa 15-31 [8]

2.4 Geologické a pedologické poměry

Dle geologické mapy [9] se tok Opava v obci Nové Heřminovy nachází v Českém masivu v moravskoslezské oblasti. Stáří útvaru je datováno do geologického období kenozoikum, což je nejmladší geologická éra periody kvartér (období mladších čtvrtohor - holocén). V oblasti se vyskytuje hornina typu nezpevněného sedimentu, nivní sediment (hlína, štěrk, kameny a písek) a droba. Území se nenachází v poddolovaném území, ani zde nedochází k těžební činnosti. Nebyly zde zjištěny žádné poruchy z hlediska geologie [9].

Z oblasti pedologických poměrů se v oblasti toku nachází převážně pseudoglej, fluvizem a kambizem [9].



13	kamenitý až hlinito-kamenitý sediment	492	droby
6	nivní sediment	491	jilovité břidlice, prachovce, droby
24	písek, štěrk		

Obr. 2.5 Geologická mapa [9]

2.5 HYDROLOGICKÉ POMĚRY

Průtoky byly naměřeny v profilu pod Oborenským potokem. Data byla poskytnuta ČHMU v prosinci 2008 s třídou přesností II [6].

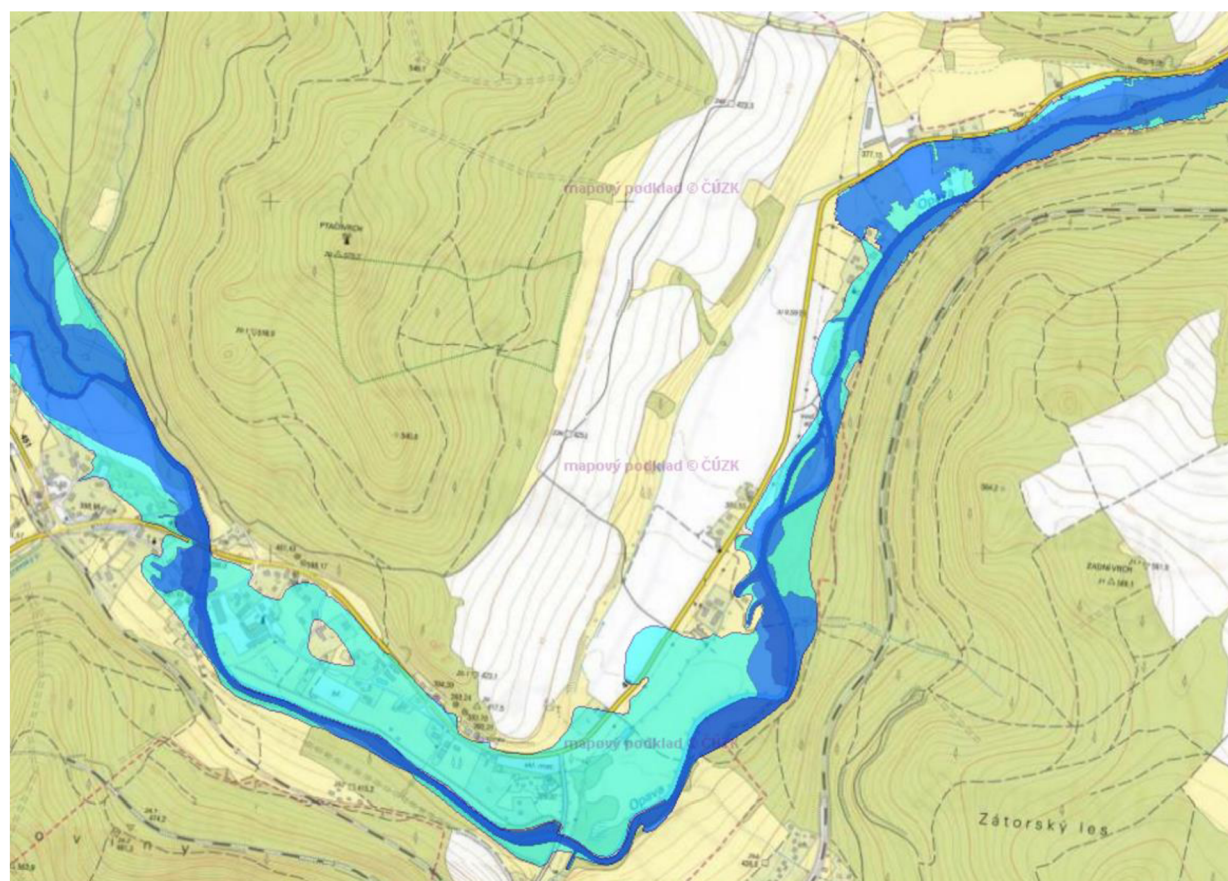
Tab. 2.1 m-denní průtoky [6]

M-denní průtoky Q_m [$m^3 \cdot s^{-1}$]												
30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
7,81	5,52	4,33	3,55	2,96	2,50	2,12	1,79	1,48	1,20	0,90	0,60	0,37

Tab. 2.2 N-leté průtoky [6]

N-leté průtoky Q_N [$m^3 \cdot s^{-1}$]						
1	5	10	20	50	100	1000
15	65,63	91,24	121,08	166,13	206,09	372,13

Na mapě na Obr. 2.6 jsou zobrazena záplavová území v zájmové oblasti pro průtoky Q_5 , Q_{20} , Q_{100} .

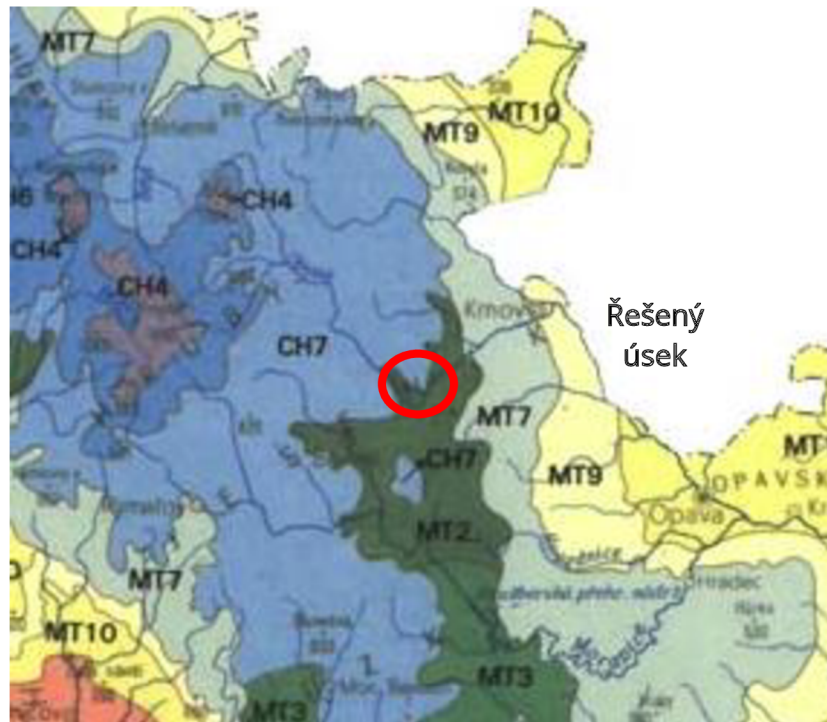


Záplavové území Q_5 ■ záplavové území Q_{20} ■ , záplavové území Q_{100} ■

Obr. 2.6 Mapa záplavového území Q_5 , Q_{20} , Q_{100} v zájmové oblasti [12]

2.6 Klimatické poměry

Zájmové území se nachází dle Quitta v chladném (CH7) a mírně teplém (MT2) pásu. Počet mrazových dní se pohybuje kolem 130 – 140, počet ledových dní kolem 50 a počet dní se sněhovou pokrývkou je kolem 100. Letních dní je 30, jasných dní kolem 50 a zatažených dní kolem 150 [11]. Průměrné roční teploty v dané lokalitě jsou kolem 7 – 8 °C a průměr ročního úhrnu srážek je 700 – 800 mm [20].



Obr. 2.7 Klimatické regiony ČR dle Quitta [11]

2.7 VD Nové Heřminovy

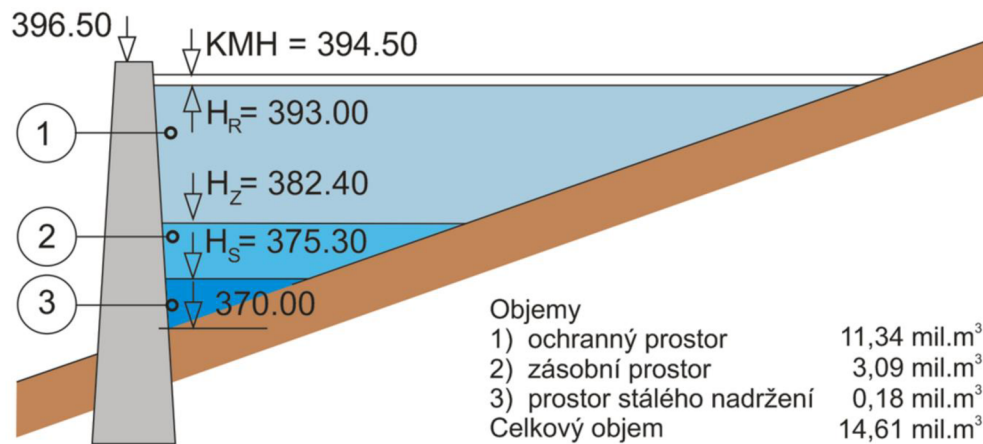
První koncept VD Nové Heřminovy byl již v roce 1923. Od té doby bylo vypracováno několik desítek námětů, dílčích studií a dalších podkladů. V roce 2007 byly zpracovány dvě studie s velkou a menší variantou nádrže. Jako výsledná varianta byla nakonec zvolena koncepce s menší nádrží v kombinaci s dalšími opatřeními a tuto variantu také v dubnu 2008 přijala vláda České republiky (ČR) [16].

Hladiny v nádrži jsou navrženy v úrovních:

- hladina stálého nadržení $H_s = 375,30$ m n. m.,
- hladina zásobního prostoru $H_z = 382,40$ m n. m.,
- hladina ochranného prostoru $H_R = 393,00$ m n. m.

Objem prostorů nádrže je:

- prostor stálého nadržení $0,18$ mil. m^3 ,
- prostor zásobní $3,09$ mil. m^3 ,
- prostor ochranný $11,34$ mil. m^3 .



Obr. 2.8 Menší nádrž Nové Heřminovy [10]

2.8 Splaveninový režim řeky Opavy

V řece Opavě dochází k významnému transportu splavenin. Transport zahrnuje dnové splaveniny a plaveniny včetně plaví (organického původu) a splachu (smyv jemnozrnných částic půdy). Splach a plaveniny nemají na formování koryta vliv. Plaví má na formování koryta nahodilý vliv. Největší vliv na formování koryta mají dnové splaveniny, které se do toku dostávají z přítoků, erozních rýh svahů, vlastním vymíláním koryta po poruše dnové dlažby nebo vymíláním při formování nového koryta [7].

3 TEORETICKÝ ZÁKLAD

3.1 Zrnitost

Zrnitostní složení dává hmotnostní podíl velikosti částice na celkové hmotnosti zeminy. Zeminu je možno rozdělit na frakce dle normy ČSN EN ISO 14688-2 (2005).

Tab. 3.1 Značení zemin dle charakteristické velikosti částice [4]

Skupina zeminy	Frakce		Značka	Char. velikost částice d [mm]
	Název	Podrobný název		
velmi hrubozrnná zemina	velký balvan		LBo	od 630
	balvan		Bo	od 200 do 630 včetně
	valoun (kámen)		Co	od 63 do 200 včetně
hrubozrnná zemina	šterk	hrubozrnný	CGr	od 20 do 63 včetně
		střednězrnný	MGr	od 6,3 do 20 včetně
		jemnozrnný	FGr	od 2 do 6,3 včetně
	písek	hrubozrnný	CSa	od 0,63 do 2 včetně
		střednězrnný	MSa	od 0,2 do 0,63 včetně
		jemnozrnný	FSa	od 0,063 do 0,2 včetně
jemnozrnná zemina	prach	hrubozrnný	CSi	od 0,02 do 0,063 včetně
		střednězrnný	MSi	od 0,0063 do 0,02 včetně
		jemnozrnný	FSi	od 0,002 do 0,0063 včetně
	jíl		CI	do 0,002 včetně

Stanovit přesnou hranici odlišení splavenin a plavenin nelze. Pohyb částic pod vodou je závislý na výsledném silovém účinku. V ČR se udává přibližná hranice 0,5 – 4 mm [4].

Zrnitostní složení dle velikosti částice se nejčastěji stanovuje následujícími metodami [4]:

- Kameny a balvany – krabicová metoda, prostrkávající metoda, metoda přímého měření atd.,
- šterk a písek – síťová metoda, fotografická metoda, vyplavovací metoda atd.,
- prach a jíl – hustoměrná metoda, dekantační metoda atd.

Výstupem je graf zrnitosti s vynesenu křivkou zrnitosti. Z grafu lze stanovit součinitel stejnozrnnosti materiálu C_u .

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (3.1)$$

kde je d_{60} , d_{10} velikost částice 60 %, 10 % hmotnostního zastoupení.

Je-li součinitel $C_u < 5$ jedná se o stejnozrnný materiál, když je hodnota v rozmezí $5 \leq C_u \leq 15$ jde o středně nestejnozrnný materiál a pokud je $C_u > 15$ je materiál nestejnozrnný.

Stanovení efektivní velikosti zrna d_e bylo provedeno z křivky zrnitosti pomocí rovnice

$$d_e = \frac{\sum \left(\frac{d_{i+1} + d_i}{2} \right) \cdot (p_{i+1} - p_i)}{\sum p_i}, \quad (3.2)$$

kde d_{i+1} a d_i jsou velikosti ok horního a dolního síta a p_{i+1} a p_i procentuální propady horního a dolního síta.

Z d_e lze následně stanovit součinitel drsnosti pro dno koryta n_d například dle Stricklera

$$n_d = \frac{d_e^{1/6}}{21,1}. \quad (3.3)$$

Charakteristikou zrnitostní křivky je také číslo křivosti

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}}, \quad (3.4)$$

která charakterizuje tvar zrnitostní křivky. Dle hodnot čísla nestejnozrnnosti a křivosti se usazenin dělí na (ČSN EN ISO 14688-2) [4]:

- stejnozrnné $C_u < 6$ a $C_c < 1$,
- středně zrněné $6 < C_u < 15$ a $C_c < 1$,
- dobře zrněné $C_u > 15$ a $1 < C_c < 3$,
- přerušovaně zrněné – chybí některá frakce.

3.2 Pórovitost usazenin

Pórovitost n_p je objem pórů V_p v celkovém objemu zeminy V_t

$$n_p = \frac{V_p}{V_t}. \quad (3.5)$$

Pro nezhutněné nestejnozrnné usazeniny (max. do 1 roka od usazení) lze pórovitost spočítat dle rovnice (Wu a Wang, 2006) [4]

$$n_p = 0,13 + \frac{0,21}{(1000 \cdot d_{50} + 0,002)^{0,21}}. \quad (3.6)$$

3.3 Hustota a viskozita

Hustota (objemová hustota) vody ρ je dána poměrem její hmotnosti m a objemu V za předpokladu rovnoměrného rozdělení

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (3.7)$$

V nádržích se vyskytují hustotní proudy (změna hustoty). V tocích a relativně málo hlubokých nádržích má na změnu hustoty vliv teplota. Hustota vody v závislosti na teplotě je v Tab. 3.2.

Viskozita vyjadřuje vnitřní tření kapaliny a vytváří odpor proti proudění, proto jsou procesy splavenin s prouděním vody stěžejní. Viskozita je dominantně závislá na teplotě. Kinematická viskozita ν se vypočítá z poměru dynamické (molekulární) viskozity μ a hustoty vody

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (3.8)$$

Hodnoty dynamické μ a kinematické ν viskozity jsou uvedeny v Tab. 3.2

Tab. 3.2 Hodnoty hustoty vody, kinematické a dynamické viskozity vody [4]

T [°C]	ρ [kg·m ⁻³]	μ [kg·(m·s) ⁻¹]	ν [m ² ·s ⁻¹]
0	999,84	0,001792	1,792·10 ⁻⁶
3,98	999,972	0,001569	1,569·10 ⁻⁶
5	999,97	0,001520	1,520·10 ⁻⁶
10	999,70	0,001308	1,308·10 ⁻⁶
15	999,10	0,001139	1,140·10 ⁻⁶
20	998,20	0,001003	1,005·10 ⁻⁶
25	997,05	0,000891	0,8936·10 ⁻⁶
30	995,65	0,000798	0,8015·10 ⁻⁶
35	994,04	0,000720	0,7243·10 ⁻⁶
40	992,22	0,000653	0,6581·10 ⁻⁶

3.4 Základní dělení částic v proudu

V toku se nachází pevné částice organického a anorganického původu. Podle charakteru proudu se částice dělí na:

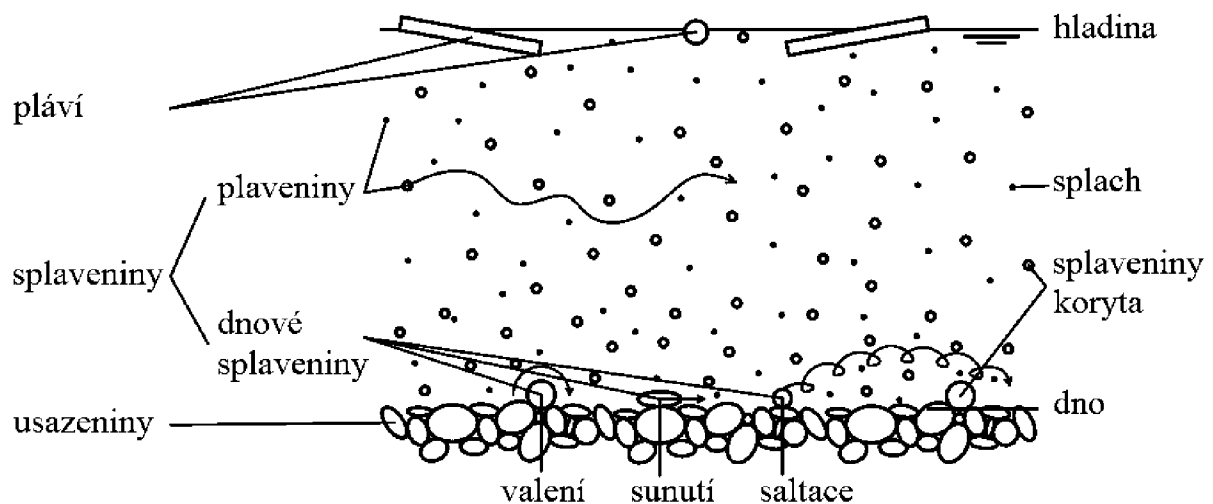
- Plaví (splaví) – plovoucí částice pohybující se při hladině (část částice je nad hladinou).
- Splaveniny – neplovoucí částice pohybující se v proudu (celá částice je pod hladinou).

Splaveniny lze následně rozdělit na:

- Dnové splaveniny – pohybují se v proudu u dna.
- Plaveniny – splaveniny pohybující se v suspenzi (vznáší se).

Splaveniny je možné také rozdělit na [4]:

- Splaveniny koryta – vznikají vymíláním koryta toku, v proudu se chovají jako dnové splaveniny i plaveniny.
- Splach (smyv) – vzniká vymíláním povrchu v povodí, v proudu se chovají jako plaveniny.



Obr. 3.1 Dělení částic v korytě toku dle jejich pohybu v proudu [4]

3.5 Splaveniny

Splaveniny jsou pevné částice různých velikostí a tvarů. Jsou posunovány proudící vodou. Jejich množství závisí na podmínkách hydraulických, geologických, pedologických, morfologických a dalších. Splaveniny jsou jedním z faktorů ovlivňujících režim toků a nádrží. Dělí se na plaveniny a dnové splaveniny. Rozlišení plavenin a dnových splaveniny je velmi obtížné, ne-li nemožné. Splaveniny se charakterizují svou velikostí, zrnitostí, protáhlostí, zploštělostí, kulovitostí, oblostí, hustotou a usazovací rychlostí [13].

3.5.1 Plaveniny

Jsou to jemnozrnné částice, minerálního i organického původu, vznášené a přenášené prouděním. Vodní tok je schopen dopravovat plaveniny na velké vzdálenosti, i když je hustota plavenin větší než hustota vody [13].

3.5.2 Dnové splaveniny

Jsou v trvalém nebo dočasném kontaktu se dnem koryta. Jedná se o tuhé částice pohybující se sunutím, valením nebo saltací. V závislosti na změnách proudění se dnové splaveniny přeměňují na plaveniny a opačně. Pevná částice uvolněná z nánosu se zpravidla nejdříve stane dnovou splaveninou, které se při větších rychlostech mění na plaveninu [13].

Pohyb dnových splavenin

V přirozených tocích probíhá pohyb dnových splavenin za povodní, kdy se jednotlivé částice pohybují v nejhlubším pásu dna nebo při vyšších vodních stavech po celém dně. V místě velkých unášecích sil se eroduje dno a nastává prohlubování. Velké částice odolávají vymílací rychlosti a tvoří tzv. dnovou dlažbu. Při pohybu dnových splavenin vznikají tyto druhy dnových útvarů:

1. Vrásy

Jsou to malé vlnky jemného materiálu, trojúhelníkového tvaru. Po proudu se pohybují menší rychlostí než je rychlost průřezová. Většinou je tvoří materiál menší než 0,6 mm. Pohybují se po směru proudu [13].



Obr. 3.2 Vrásky [13]

2. Duny

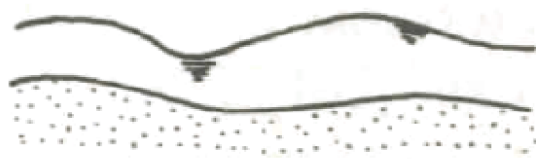
Objevují se při průtocích vody větších než vrásky. Mají trojúhelníkový tvar a jsou větší než vrásky. Pohybují se po směru proudu [13].



Obr. 3.3 Duny [13]

3. Antiduny

Mají rovněž trojúhelníkový tvar. Vznikají při Froudovu číslu větším než 0,8. Pohybují se protiproudě [13].



Obr. 3.4 Antiduny [13]

3.6 Vývoj krycí vrstvy

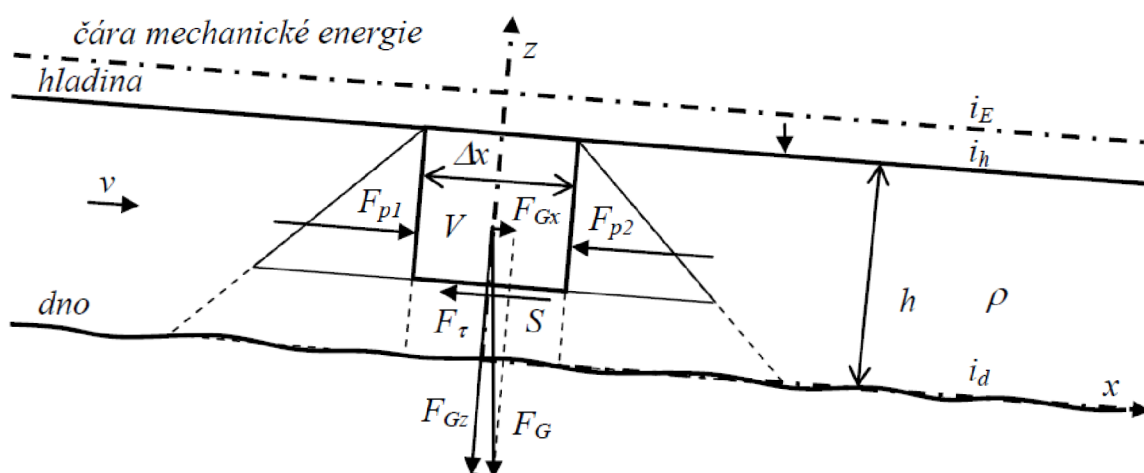
U nestejnoprnných usazenin dochází v krycí vrstvě k třídění částic. Z krycí vrstvy se postupně vymílají malé částice, zůstávají zde pouze částice s velkou stabilitou a tím vzniká dnová dlažba. V případě stejnozrnných usazenin nedochází ke vzniku dnové dlažby. V krycí vrstvě může docházet ke statickému nebo dynamickému třídění zrn. Statické třídění nastává v případě hladové vody (voda nenasycená splaveninami), kdy malé málo stabilní částice se vymílají a zůstávají pouze velké částice a částice v úplavu velkých částic. Dynamické třídění nastává v proudění se splaveninami, kdy vlivem různých usazovacích rychlostí dochází k rozvrstvení v krycí vrstvě. Velké částice tvoří souvislou vrstvu a menší částice proudící po ní jsou vymlety. Na počátek pohybu splavenin má vliv míra vytřídění krycí vrstvy. Čím větší je vytřídění krycí vrstvy, tím větší je hodnota bezrozměrného smykového napětí pro počátek pohybu splavenin [4].



Obr. 3.5 Detail dnové dlažby v toku Opava (2016)

3.7 Smykové napětí v rovnoměrném proudu

Smykové napětí je po hloubce dáno účinkem sil ve směru smykového napětí na vymezený reprezentativní elementární objem. Působícími silami jsou tíha elementu F_{Gx} , třecí síla F_τ a síly od hydrostatického tlaku F_{p1} , F_{p2} . Dle smykového napětí na dně lze také stanovit počátek pohybu částic viz kapitola 3.8 [4].



Obr. 3.6 Schéma pro výpočet smykového napětí [4]

Ve směru osy x musí platit rovnováha sil

$$F_{Gx} + F_{p1} = F_\tau + F_{p2}, \quad (3.9)$$

kde u rovnoměrného proudění jsou síly F_{p1} a F_{p2} stejně velké, ale v opačném směru, proto se vyruší. Síla ve směru x ($i = i_d = i_h = i_E$) od tíhy reprezentativního objemu je

$$F_{gx} = F_g \cdot i = (h - z) \cdot dx \cdot dy \cdot \rho \cdot g \cdot i \quad (3.10)$$

a třecí síla F_τ od smykového napětí τ je

$$F_\tau = \tau \cdot dx \cdot dy. \quad (3.11)$$

Smykové napětí se získá dosazením rovnic (3.10) a (3.11) do rovnice (3.9)

$$(h - z) \cdot dx \cdot dy \cdot \rho \cdot g \cdot i = \tau \cdot dx \cdot dy \quad (3.12)$$

a po úpravě

$$\tau = (h - z) \cdot \rho \cdot g \cdot i. \quad (3.13)$$

3.8 Počátek pohybu splavenin

Při počátku pohybu splavenin dochází k poruše stability usazené částice a stane se z ní splavenina. Dochází k uvedení částice do pohybu. Na dně se nachází mnoho částic s rozdílnými podmínkami počátku pohybu, a proto je stanovení počátku pohybu částic jako celku velmi obtížné.

Stanovení počátku pohybu splavenin je možné následujícími metodami:

- Vizuální pozorování – u stejnozrnných částic se stanovuje množství částic v pohybu. U nestejnozrnných částic se stanovuje velikost určité frakce částic v pohybu.
- Extrapolace křivky průtoku splavenin k referenční hodnotě – měří se průtok splavenin a tečné napětí s následným převedením na bezrozměrnou podobu a proložením vhodné aproximační křivky. Křivku lze extrapolovat do požadované hodnoty.
- Teoretické odvození.

Za pomoci silové, momentové, hybností nebo energetické rovnováhy lze provést deterministické odvození. Odvození je možné i stochastickým přístupem, anebo rozměrovou analýzou doplněnou o příslušné součinitele.

3.8.1 Výpočet počátku pohybu splavenin

Výpočet počátku pohybu splavenin je dle teoretického odvození pomocí metody stupně bezpečnosti. Stanovuje se odolnost částice s určitým stupněm bezpečnosti SF vůči návrhovému průtoku. Stanovení bezrozměrné velikosti částice d^* [4]:

$$d^* = \left(\frac{\rho_z - \rho}{\rho} \cdot \frac{g}{\nu^2} \right)^{1/3} \cdot d, \quad (3.14)$$

kde ρ je hustota vody, ρ_z hustota částice, d velikost částice, g tíhové zrychlení, ν kinematická viskozita.

Pro praktické použití se stanovuje počátek pohybu splavenin pomocí zjednodušené rovnice, kdy na hydraulicky rovném dně, u nesoudržných usazenin, je dominantní úhel vnitřního tření částic φ [4]

$$\tau_{c\varphi}^* = \frac{\tan \varphi}{6,5 + 14 \cdot \tan \varphi}. \quad (3.15)$$

Vzájemný vztah odvozený z měřených dat pro přibližně stejné částice a počátek stanovený přibližně stejně má [4]:

$$\tau_c^* = \tau_{c\varphi}^* \cdot (C_{\tau^*} \cdot e^{-d^*/3} + e^{-5/d^*}), \quad (3.16)$$

kde C_{τ^*} součinitel určený metodou minima čtverců a jeho hodnota je $C_{\tau^*} = 4,5$. Sklon povrchu má zásadní vliv na počátek pohybu splavenin, z důvodu působení změny úhlu mezi silami. Pro vyhodnocení počátku pohybu je nutné uvažovat s bezrozměrným smykovým napětím na skloněném povrchu. V případě podélného sklonu s úhlem α platí pro bezrozměrné smykové napětí podél skloněného povrchu (rovnice je platná při $\alpha < \varphi$ a $\alpha > 0$) [4]:

$$\tau_{c\alpha}^* = \tau_c^* \cdot \cos \alpha \cdot \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \varphi} \right). \quad (3.17)$$

Pro příčně skloněný povrch s úhlem β platí pro bezrozměrné smykové napětí na příčně skloněném povrchu za podmínky $\beta < \varphi$

$$\tau_{c\beta}^* = \tau_c^* \cdot \cos \beta \cdot \left[1 - \left(\frac{\tan \beta}{\tan \varphi} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.18)$$

Kombinací rovnic (3.17) a (3.18) získáme bezrozměrné smykové napětí na skloněném povrchu pro příčně a podélně skloněný povrch

$$\tau_{c\alpha\beta}^* = \tau_c^* \cdot \cos \alpha \cdot \left\{ \cos \beta \cdot \left[1 - \left(\frac{\tan \beta}{\tan \varphi} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{\tan \alpha}{\tan \varphi} \right\} \quad (3.19)$$

Smykové napětí pro dno je stanoveno z rovnice (3.13) při dosazení $z = 0$

$$\tau_d = h \cdot \rho \cdot g \cdot i, \quad (3.20)$$

kde i je sklon dna.

Vztah pro výpočet bezrozměrného smykového napětí je [4]:

$$\tau^* = \frac{\tau_d}{g \cdot d \cdot (\rho_z - \rho)}. \quad (3.21)$$

Na základě metody stupně bezpečnosti je potřeba bezrozměrné smykové napětí vypočítané z charakteristik proudu vynásobit stupněm bezpečnosti SF a musí být menší nebo rovno kritickému bezrozměrnému napětí pro danou částici za daného sklonu povrchu s úhly α a β

$$\tau^* \cdot SF \leq \tau_{c\alpha\beta}^*. \quad (3.22)$$

Hodnota stupně bezpečnosti se volí $SF \geq 1,0$ s ohledem na významnost konstrukce (balvanité skluzy, prahy ve dně atd.). Pro počátek pohybu splavenin pro přírodní dno se uvažuje hodnota $SF = 1$.

3.9 Výpočet proudění vody

Pro výpočet jednorozměrného (1D) ustáleného nerovnoměrného proudění vody se používá metoda po úsecích s užitím Bernoulliho rovnice

$$Z_j + h_j + \frac{\alpha_j \cdot v_j^2}{2 \cdot g} = Z_{j+1} + h_{j+1} + \frac{\alpha_{j+1} \cdot v_{j+1}^2}{2 \cdot g} + h_{z,k}, \quad (3.23)$$

kde indexy j a $j+1$ jsou označení horního a dolního profilu, Z je výška od srovnávací roviny, h hloubka vody od dna, α součinitel kinetické energie (Coriolisovo číslo), v je průřezová rychlost a g je tíhové zrychlení.

Celková zkratová výška v úseku k je $h_{z,k}$ je součtem ztráty třením a ztráty místní

$$h_{z,k} = l_k \cdot \left(\frac{Q_k}{K_k}\right)^2 + \xi_k \left| \frac{\alpha_{j+1} \cdot v_{j+1}^2}{2 \cdot g} - \frac{\alpha_j \cdot v_j^2}{2 \cdot g} \right|, \quad (3.24)$$

kde ξ_k je součinitel místní ztráty, l_k délka úseku mezi profily, Q_k průtok vody a K_k modul průtoku.

Jelikož se může způsob výpočtu některých veličin ve výše uvedených rovnicích s použitým programem měnit, jsou dále uvedeny rovnice programu HEC-RAS, který je pro řešení použit. Podrobněji je popsán v kapitole 6. Průtočný profil se rozdělí na 3 části. Levou bermu (LOB), pravou bermu (ROB) a koryto (CH). V každé části je průtok Q počítán zvlášť. Vzdálenost mezi profily l_k je počítána váženým průměrem mezi jednotlivými částmi [5]

$$l_k = \frac{l_{LOB} \cdot Q_{LOB} + l_{CH} \cdot Q_{CH} + l_{ROB} \cdot Q_{ROB}}{Q_{LOB} + Q_{CH} + Q_{ROB}}. \quad (3.25)$$

Průměrný modul průtoku K v úseku k je [5]

$$K_k = \frac{K_j + K_{j+1}}{2}. \quad (3.26)$$

Modul průtoku K v profilu j je [5]

$$K_j = K_{LOB} + K_{CH} + K_{ROB}. \quad (3.27)$$

Modul průtoku v bermách LOB a ROB pro jednotlivé dílčí části i je [5]

$$K_{LOB} = \sum_{i=1}^{n_{LOB}} K_i; \quad K_{ROB} = \sum_{i=1}^{n_{ROB}} K_i. \quad (3.28)$$

Dílčí modul průtoku K_i je [5]

$$K_i = \frac{1}{n_i} \cdot S_i \cdot R_i^{2/3}. \quad (3.29)$$

Hydraulický poloměr R je dán průtočným profilem a omočeným obvodem dané části

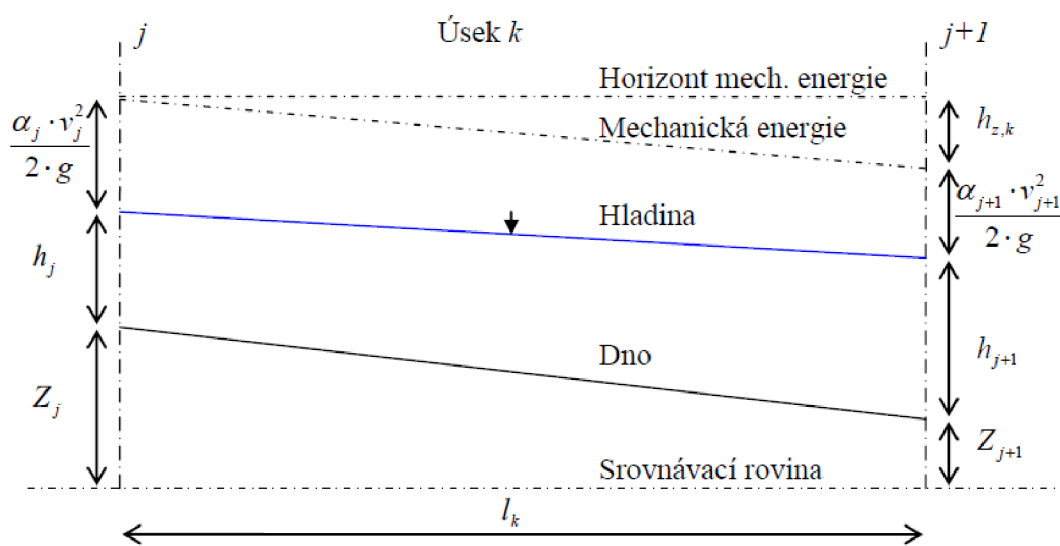
$$R_i = \frac{S_i}{o_i}. \quad (3.30)$$

Součinitel drsnosti n je dán váženým průměrem v dané části [5]

$$n_i = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (o_i \cdot n_i^{1/2})}{o} \right]^{2/3}. \quad (3.31)$$

Součinitel kinetické energie α je pro celý profil j [5]

$$\alpha_j = \frac{S_j^2 \left(\frac{K_{LOB}^3}{S_{LOB}^2} + \frac{K_{CH}^3}{S_{CH}^2} + \frac{K_{ROB}^3}{S_{ROB}^2} \right)}{K_j^3}. \quad (3.32)$$



Obr. 3.7 Schéma pro výpočet Bernoulliho rovnice [7]

3.10 Výpočet proudění splavenin

Základní rovnicí pro řešení transportu splavenin je rovnice spojitosti splavenin [7]. Pro 1D proudění bez zdrojů a propadů ji lze zapsat pro použití v metodě po úsecích ve tvaru

$$\frac{Q_{v,d} - Q_{v,h}}{0,5 \cdot (l_d + l_h)} + \frac{b_s (h_s^{t+\Delta t} - h_s^t)}{\Delta t} = 0, \quad (3.33)$$

kde $Q_{v,d}$ je objemový průtok splavenin dolním profilem (odtok splavenin), $Q_{v,h}$ je objemový průtok splavenin horním profilem (přítok splavenin), l_d je vzdálenost dolního profilu, l_h je vzdálenost horního profilu, b_s je šířka aktivní části dna koryta, h_s^t je hloubka splavenin v čase t (před časovým krokem), $h_s^{t+\Delta t}$ je hloubka splavenin v čase $t + \Delta t$ (po časovém kroku) a Δt je časový krok.

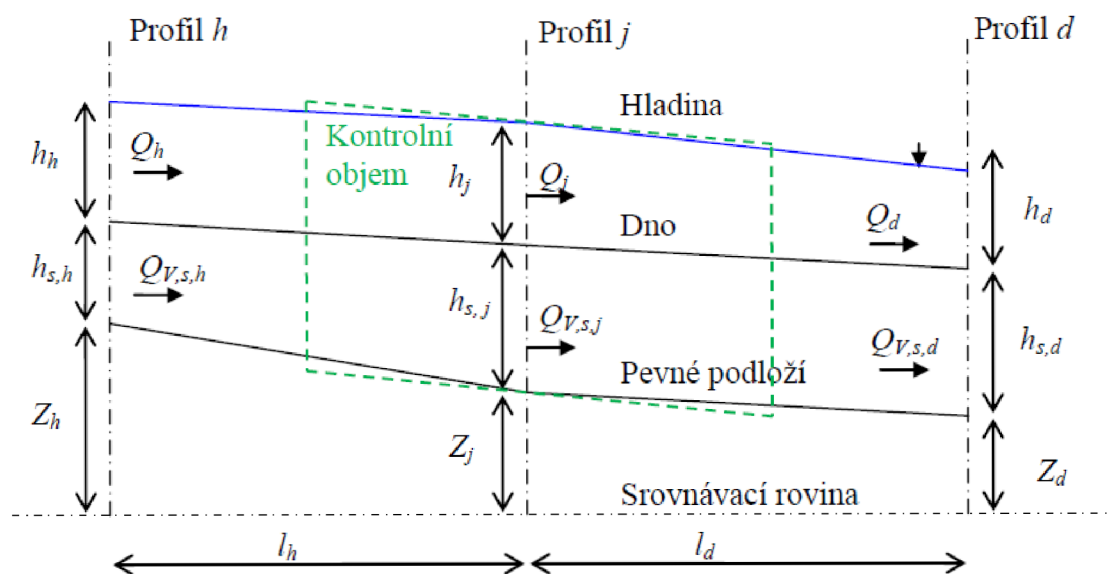
Hustota částice pod vodou $\bar{\rho}_z$ je rozdílem hustoty částice ρ_z a hustoty vody ρ [7]

$$\bar{\rho}_z = \rho_z - \rho. \quad (3.34)$$

Objemová hustota splavenin pod vodou je [7]

$$\bar{\rho}_s = (1 - n_p) \cdot (\rho_s - \rho), \quad (3.35)$$

kde n_p je pórovitost usazenin.



Obr. 3.8 Schéma pro výpočet spojitosti splavenin [7]

Výpočet transportu splavenin je prováděn s použitím tzv. efektivní hloubky a efektivní šířky [7]:

$$h_e = \frac{\sum_{i=1}^n (h_{p,i} \cdot S_i \cdot h_{p,i}^{2/3})}{\sum_{i=1}^n (S_i \cdot h_{p,i}^{2/3})}, \quad (3.36)$$

$$b_e = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i \cdot h_{p,i}^{2/3})}{h_e}, \quad (3.37)$$

kde S_i je průtočný průřez. V případě rovnoměrného ustáleného proudění bez zanášení a vymílání je kapacita průtoku splavenin dána obvykle experimentálně stanovenými rovnicemi. Rovnice Meyera-Petra a Müllera (MPM) pro štěrky je [5]:

$$\left(\frac{k_c}{k_s}\right)^{3/2} \cdot \gamma \cdot R_d \cdot i = c_A \cdot (\gamma_z - \gamma) \cdot d_m + c_B \left(\frac{\gamma}{g}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\gamma_z - \gamma}{\gamma_z}\right)^{2/3} \cdot \overline{q_{ms}}^{2/3}, \quad (3.38)$$

kde k_c je makrodrsnost dna, k_s je mikrodrsnost dna, γ je měrná tíha vody, γ_z je měrná tíha zrna, i je sklon čáry energie, c_A je empirický součinitel vyjadřující počátek pohybu částice ($c_A = 0,047$), d_m je medián rozměru zrn, c_B je empirický součinitel vyjadřující průtok splavenin ($c_B = 0,25$), $\overline{q_{ms}}$ je specifický hmotnostní průtok splavenin vážený pod vodou. Specifický hmotnostní průtok se spočítá z rovnice [7]:

$$q_s = \overline{q_{ms}} \cdot \left(\frac{\gamma_z}{\gamma_z - \gamma}\right). \quad (3.39)$$

Vymílání a zanášení je závislé na schopnosti průtoku transportovat splaveniny profilem kontrolního objemu a závisí na přítoku splavenin do kontrolního objemu. V případě, kdy je transportní schopnost daného průtoku v profilu kontrolního objemu menší, než přítok splavenin, dochází k zanášení v kontrolním objemu, pokud je větší, dochází k vymílání. Pro každou frakci je transport řešený zvlášť. Vymílání a zanášení je také závislé na třídění částic v krycí vrstvě.

3.11 Usazování částic

Usazování částic lze rozdělit na usazování částic ve stojaté vodě a proudící vodě. Ve stojaté vodě je úloha bez účinku tření vyvolaných prouděním vody. Proudění způsobuje rotaci částice. Turbulentní proudění způsobuje vznik fluktuace rychlosti a vírů, které dominantně ovlivňují usazování [4].

Usazování částic ve stojaté vodě

Usazování částic ve stojaté vodě vychází z usazovací rychlosti zrna w , času t a hloubky h . Usazovací rychlost je závislá na hustotě zrna ρ_z , hustotě vody ρ , reprezentativním průměru zrna d , tíhovém zrychlení g , tvaru zrna, dynamické viskozitě vody μ , kinematické viskozitě vody ν , objemové koncentraci částice ve vodě a na silách molekulárních a elektrických.

Nejčastěji se usazovací rychlost rozděluje na tři části – laminární, přechodnou a plně turbulentní oblast usazování. Pro kulová zrna, při nerušeném usazování a ustáleném stavu se např. používají [4]:

Pro **laminární oblast** obtékání (pevná zrna s $Re_{wd} < 1$) platí Stokesova rovnice (experimentálně ověřená):

$$w = \frac{(\rho_z - \rho) \cdot g \cdot d^2}{18 \cdot \mu}, \quad (3.40)$$

pro **přechodnou oblast** obtékání (zrna v rozsahu $2 < Re_{wd} < 500$) se používá rovnice:

$$w = 0,153 \cdot \frac{d^{1,14} \cdot (\rho_z - \rho)^{0,71} \cdot g^{0,71}}{\rho^{0,29} \cdot \nu^{0,43}}, \quad (3.41)$$

pro **plně turbulentní oblast** proudění ($500 < Re_{wd} < 200\,000$) se používá rovnice:

$$w = 1,74 \cdot \sqrt{\frac{\rho_z - \rho}{\rho}} \cdot d \cdot g. \quad (3.42)$$

Reynoldsovo číslo (kritérium) pro částici při jejím obtékání Re_{wd} (sedimentace) se stanoví

$$Re_{wd} = \frac{w \cdot d}{\nu}, \quad (3.43)$$

kde w je usazovací rychlosti zrna, d je velikost částice a ν je viskozita.

Usazování částic v tekoucí vodě

Rozdíl oproti usazování ve stojatých vodách je, že dochází k ovlivňování usazování turbulencí a silami vyvolanými rychlostním profilem. Pokud se jedná o nekulové částice, usazovací rychlost částice závisí navíc na ploše průřezu částice ve směru usazování a jejím příslušném součiniteli tvarového odporu. Dále pak na třecím odporu závislém na natočení zrna, za nímž může nastat úplav. Výpočet lze provést dle mnoha autorů v závislosti na omezujících podmínkách. Dle Van Rijna [5] pro přirozeně tvarované částice s platností $0,001 \text{ mm} < d < 0,1 \text{ mm}$:

$$w = \frac{(s-1) \cdot g \cdot d^2}{18 \cdot \nu}, \quad (3.44)$$

pro velikost částice $0,1 \text{ mm} < d < 1 \text{ mm}$:

$$w = \frac{10 \cdot \nu}{d} \left[\left(1 + \frac{0,01 \cdot (s-1) \cdot g \cdot d}{\nu^2} \right)^{1/2} - 1 \right]. \quad (3.45)$$

Pro částice $d > 1 \text{ mm}$:

$$w = 1,1 \cdot [(s-1) \cdot g \cdot d]^{1/2}, \quad (3.46)$$

kde $s = \frac{\rho_z}{\rho}$.

4 ZANÁŠENÍ NÁDRŽÍ

Ukládání sedimentů je jedním z hlavních problémů postihujících vodní nádrže. Aby bylo možné předvídat zanášení a navrhovat opatření, která bude v budoucí době na nádrži potřeba provést, musí být známa rychlost zanášení a způsob zanášení nádrže. Pro stanovení zanášení nádrže je třeba znát transportní procesy přítoků, konkrétně informace o přítoku splavenin a jejich zrnitosti [3]. Nejzávažnější problémy spojené se zanášením nádrží jsou [2]:

- zmenšení objemu nádrže,
- zhoršení jakosti akumulované vody v důsledku rozpadu organického podílu sedimentů v důsledku adsorpce toxických látek na povrchu částic,
- ovlivnění manipulačních zařízení, případně abraze turbín u nádrží s vodní elektrárnou,
- zhoršení kyslíkové bilance,
- zhoršení protipovodňové ochrany v úseku nad nádrží vlivem vzduť hladiny vody nánosy,
- degradace dna vznikem hladové vody pod hrází.

4.1 TRANSPORT SEDIMENTŮ

Při přítoku do vodní nádrže se rychlost proudění sníží natolik, že začne proces sedimentace. Dnové splaveniny a hrubší frakce plavenin začnou okamžitě sedimentovat v prostoru říční delty, zatímco jemnější částice s menší sedimentační rychlostí pokračují dále do nádrže [3].

Nádrž s jedním ustáleným přítokem a konstantní úrovní hladiny vody reprezentuje ustálené prostředí a je nejjednodušším případem zanášení nádrže. Uvedený stav je však v přírodních podmínkách nereálný vlivem hydrologických podmínek, velikostí zrna sedimentů, manipulace s hladinou a geometrie nádrže. V nádrži s kolísající hladinou vody, nebo pokud je nádrž pravidelně vypouštěna, může docházet ke značnému narušení sedimentů, či erozi svahu vlivem vln. Další komplikace může nastat, pokud se na toku vyskytuje významný externí zdroj splavenin [3].

Většina sedimentů v nádrži je transportována pomocí tří základních procesů [3]:

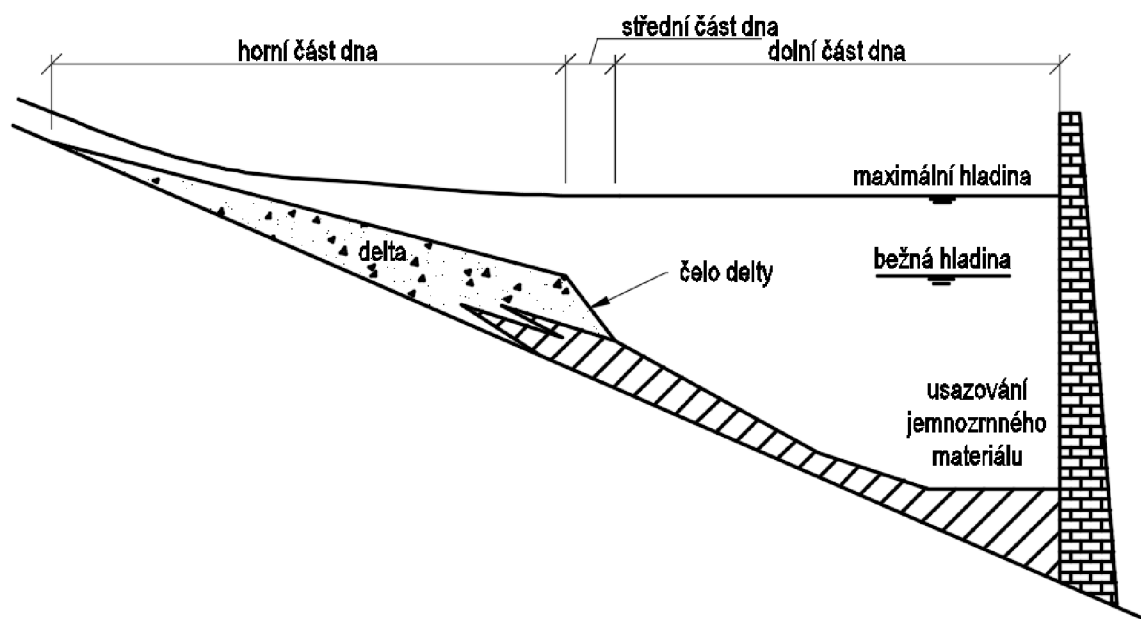
- transport hrubého materiálu po dně, podél plošiny delty,
- transport jemných částic v proudech obvykle rozvětveného koryta,
- transport jemných částic hustotními proudy v nádrži.

Sedimentace v podélném směru

V podélném směru je možné rozdělit dno nádrže na tři hlavní oblasti [3]:

- horní část – odpovídající říční deltě, částice rychle sedimentují,
- střední část – zvětšený sklon, zmenšená zrnitost sedimentů,
- dolní část – jemnozrnné sedimenty, sedimentace pomocí hustotních proudů.

Nánosy delt mohou obsahovat jak hrubé tak jemné sedimenty. V případě velké povodně, většího odběru vody z nádrže nebo sesuvu svahů, se hrubozrnné sedimenty mohou dostat také do dolní části nádrže.



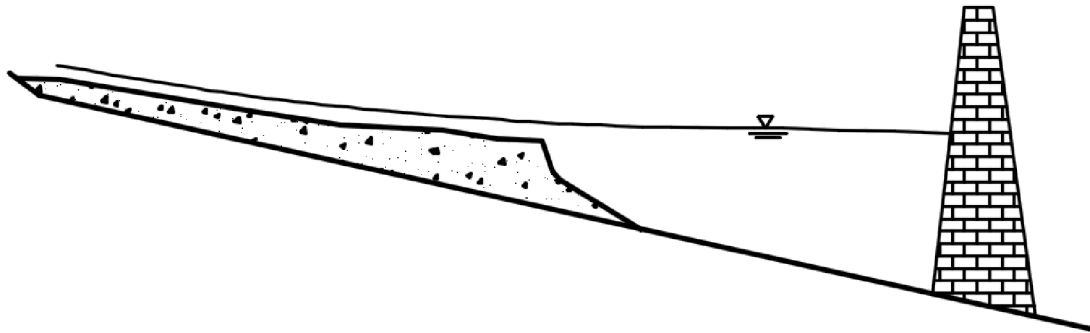
Obr. 4.1 Sedimentace v podélném směru [3]

Sedimentace v podélném směru se u každé nádrže výrazně liší, vlivem geometrie, odtoku z nádrže, velikostí částic a dalšími rozdíly v provozu nádrže.

V podélném směru existují čtyři základní typy ukládání sedimentů v závislosti na provozu nádrže a charakteristice přitékajících sedimentů [3]:

1. Delta nános

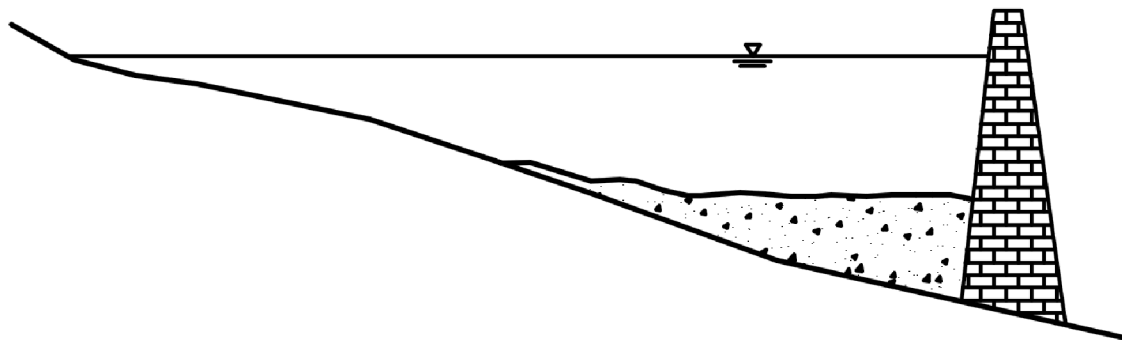
Obsahuje nejhrubší frakci sedimentů. Dochází k velmi rychlému ukládání v oblasti vtoku do nádrže. Jedná se o částice větší než 0,062 mm. Může také obsahovat velké množství jemnozrnného materiálu a bahna (tlející organická hmota) [3].



Obr. 4.2 Delta nános [3]

2. Klínový nános

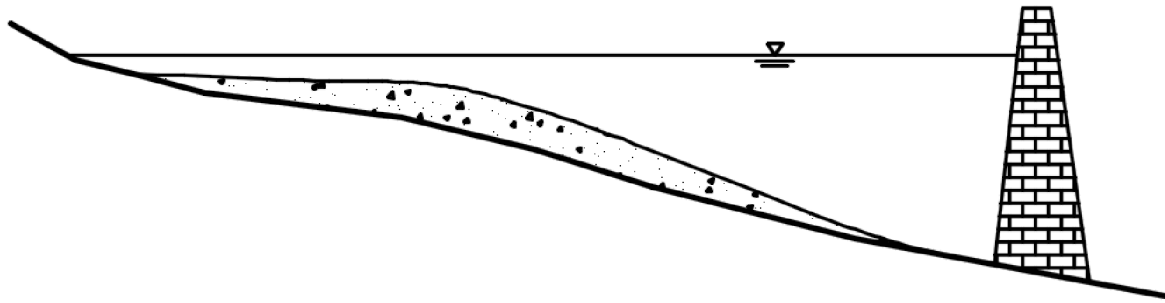
Nejtlustší nános se nachází u hráze nádrže a postupně se proti proudu ztenčuje. Tento tvar nánosu je způsoben transportem jemného materiálu pomocí hustotních (turbiditních) proudů. Klínové nánosy se objevují u malých nádrží za velkého přítoku vody s jemnými sedimenty a u velkých nádrží provozovaných při nízké hladině vody za povodňových stavů. Při těchto stavech dochází k přesunu sedimentů až k nejhlubšímu místu nádrže – oblast hráze [3].



Obr. 4.3 Klínový nános [3]

3. Zužující se nános

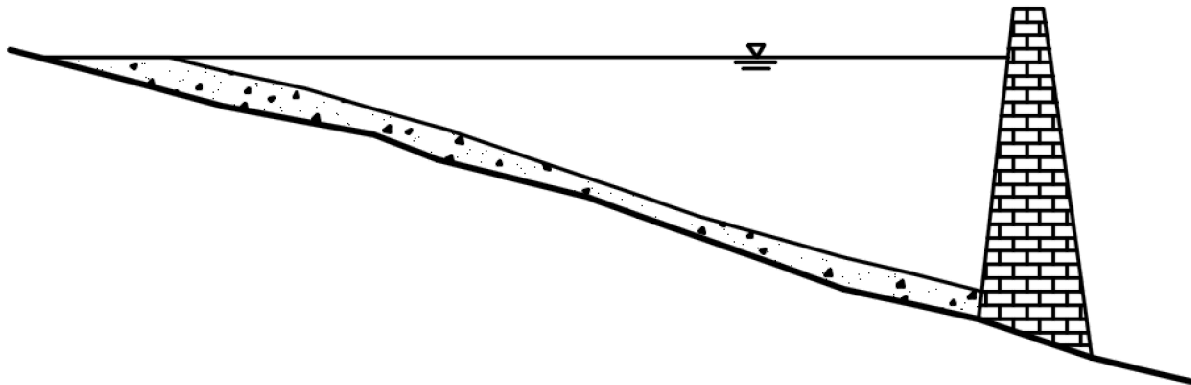
Vyskytuje se u dlouhých nádrží s vysokou hladinou nadržení. Dochází k pravidelnému, čím dál tenčímu ukládání sedimentů směrem k hrázi [3].



Obr. 4.4 Zužující se nános [3]

4. Rovnoměrný nános

Jedná se o neobvyklý případ ale i přesto může nastat. Vzniká na úzkých nádržích s častým kolísáním hladiny a při malém přítoku jemných sedimentů [3].



Obr. 4.5 Rovnoměrný nános [3]

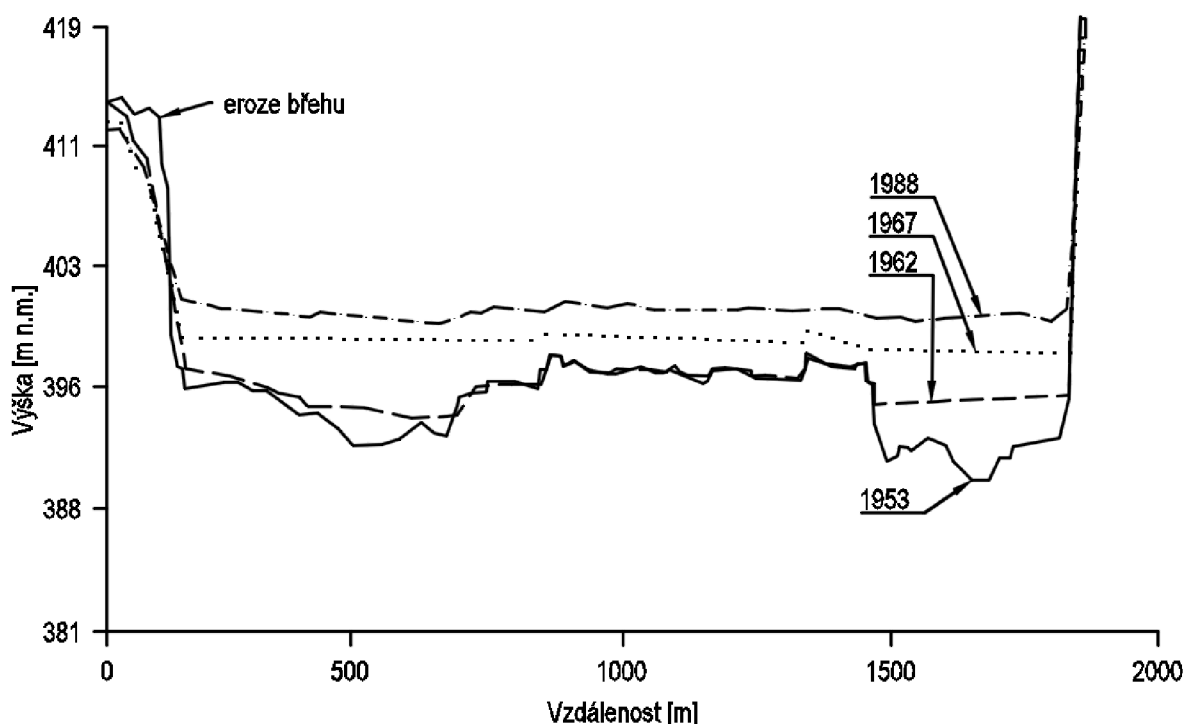
Sedimentace v příčném směru

V nejhlubších částech příčného řezu dochází k počáteční tvorbě usazenin. Nánosy se zde formují téměř do vodorovné polohy (Obr. 4.6), a to bez ohledu na původní tvar průřezu. Pokud nedochází ke vzniku vodorovné polohy, dochází pravděpodobně k lokálnímu přítoku, úsek toku je v oblouku nebo dochází k erozi způsobené odběrem či proplachováním [3].

Sedimentace v nejhlubších místech průřezu nastává za těchto procesů [3]:

- hustotní proudy s transportem a sedimentací podél údolnice,
- usazování vlivem vertikální koncentrace suspenze v profilu,
- pokud je v příčném profilu koncentrace rovnoměrně rozdělena po hloubce, výška sedimentů bude závislá na hloubce vody.

Na Obr. 4.6 je zobrazen příčný řez nádrže Lake Francis Case na řece Missouri. Byl pozorován vývoj zanášení a eroze v měřených letech. Pozorování provedla firma Stanley Consultants [3].



Obr. 4.6 Příčný řez vývoje zanášení a eroze v nádrži Lake Francis Case na řece Missouri [3]

Vrstvení sedimentů

Sedimenty jsou do nádrže dodávány v impulzech, vznikajících v průběhu přívalových srážek, které jsou odděleny obdobími nízkých průtoků. Během těchto impulzů dochází k vystřídání vrstev hrubých a jemných sedimentů. Vrstvy se mohou odkrýt v oblasti sedimentace, nebo v oblasti kde dochází k odběru vody [3].

Při sezonním vypouštění nebo při akumulaci organického materiálu (řasy, listy ve vodě apod.) může také docházet ke tvorbě pravidelných vrstev bahna. Za předpokladu, že nedojde k rozrušení sedimentů v nádrži, lze rekonstruovat historii vzniku sedimentů [3].

Vliv manipulačního a provozního řádů

Manipulační a provozní řád nádrže má velký vliv na akumulaci sedimentů a jeho změnou může být docíleno zlepšení splaveninového režimu v nádrži [3].

Eroze břehů a sesuvy svahů

Vodní nádrž má vzhledem ke své celkové ploše poměrně dlouhý obvod. Eroze svahů může být významným zdrojem zanášení, nebo i ohrožení blízkých staveb. Sesuvy svahů jsou velmi nebezpečné, zvláště pak při povodních [3].

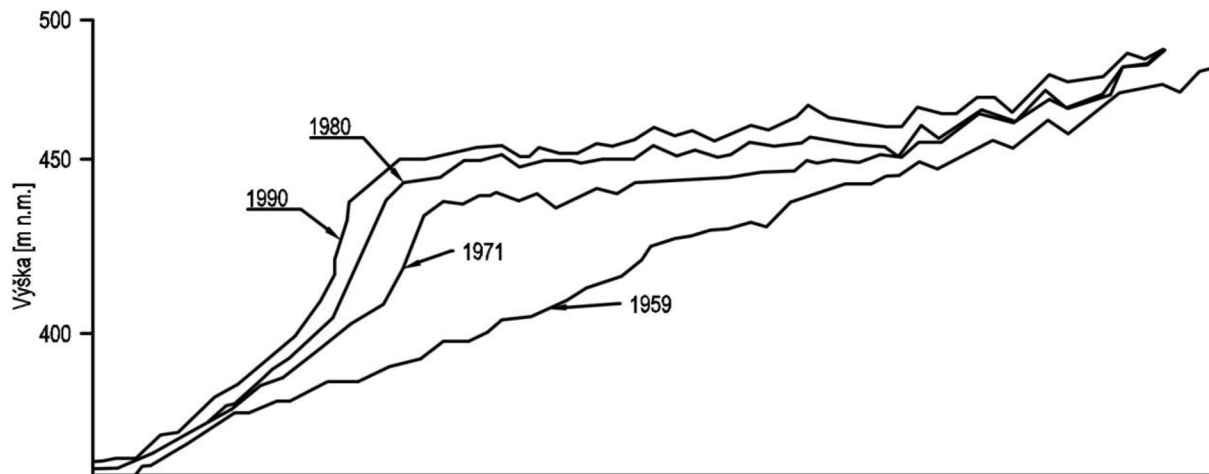
Nejhorší katastrofa sesuvu svahu se stala roku 1963, kdy se do nádrže VD Vaiont v severní Itálii sesunula masivní část skály o objemu 270 milionů m³. Nádrž Vaiont má objem pouze 115 mil. m³. Skalní sesuv se sesunul do nádrže rychlostí přibližně 30 m·s⁻¹ a vytvořil povodňovou vlnu, která překonala hráz vysokou 265 m (v době dokončení byla jedna z nevyšších). Hráz zůstala nepoškozená, ale vlivem vlny utonulo asi 2600 obětí (přesný počet nebyl nikdy zjištěn) [3].

Delta nános

Delta je nejvíce viditelná část nánosů v nádrži. Často se stává, že delta představuje pouze malou část zachycených sedimentů. Delta se nachází v horní části nádrže, při zaústění toku do nádrže a rozšiřuje se převážně směrem po proudu. Dokonce i malé nánosy v horní části nádrže mohou způsobovat problémy agradace toku. Deltu lze charakterizovat dle [3]:

- náhlé změny sklonu svahu ve střední části dna viz Obr. 4.1,
- proměnné zrnitosti,
- manipulace s hladinou nádrže.

V hlubokých nádržích bylo pozorováno, že se delta může tvořit při různých úrovních hladiny. U dlouhých, úzkých nádrží se delta nemusí vůbec vyskytovat. Dochází pouze k náhlé změně zrnitosti. Růst delty může být zpočátku velmi rychlý vlivem poměrně malé hloubky a malé kapacity v horní části nádrže. S postupem času, kdy se začne zanášet hlubší část nádrže, dojde ke zpomalení podélného růstu delty. Postupem času dochází k posunu delty a jemnozrný materiál, který sedimentoval dříve, překrývá hrubozrný materiál. Zpomalení růstu je možné sledovat na Obr. 4.7. Jedná se o nádrž Bhakra v Indii [3].



Obr. 4.7 Podélný profil nádrže Bhakra v Indii (podélné staničení nebylo součástí obrázku) [3]

4.2 OPATŘENÍ PROTI ZANÁŠENÍ NÁDRŽÍ

Zabránit přítoku splavenin je prakticky nemožné. Splaveniny se do nádrží dostávají a zmenšují využitelný objem nádrže. Mrtvý prostor nádrže je zanášen nejrychleji jemnozrnnými usazeninami. V místě přítoku do nádrže dochází zase k sedimentaci hrubozrnných částic. Zabránit zmenšování objemu nádrže lze několika způsoby [4].

Zmenšení přítoku splavenin

Zmenšení přítoku splavenin lze zejména zmenšením splachu z povodí úpravami v povodí, případně stabilizací břehů nádrže [4].

Usazovací nádrž

Splaveniny se mohou zachytit například usazovací nádrží, která se umístí před danou nádrží, nebo se přímo stane její součástí. Po zanesení usazovací nádrže je třeba ji vytěžit a odvést usazeniny a tím dojde ke znovuobnovení funkčnosti nádrže [4].

Přesun splavenin

Přesun splavenin lze provést třemi způsoby [4]:

- Převoz nákladními automobily z usazovacích prostorů do prostoru pod hrází.
- Trubním převodem nádrží (tlakové proudění).
- Převod mimo nádrž tunelem nebo štolou.

Převoz automobily se volí v případě malého sklonu a nerealizovatelnosti ostatních metod přesunu. U nádrže s krátkou spojnicí mezi začátkem a koncem vzduť je vhodné využít tunel nebo štolu [4].

Těžba usazenin z nádrže

Těžba usazenin z nádrže se provádí, když je nádrž buď napuštěná, nebo částečně vypuštěná. Varianta s částečným vypuštěním je ekonomicky výhodnější [4].

Proplachování nádrží

Proplachování se používá u nádrží, kde převládají plaveniny. Metoda funguje na principu, že se plně otevřou spodní výpusti a objem hustotního proudu se vypustí do koryta pod hrází. Dojde ke snížení usazení plavenin. Metoda je vhodná při snížené hladině v nádrži, kdy dojde i k odstranění části nánosů v nádrži. Při použití této metody dojde ke krátkodobému zvětšení zanášení koryta pod hrází [4].

Řízené usazování

Řízené usazování zabezpečuje tvorbu nánosů mimo nádrž, nebo v určitých částech nádrže. Proud obsahující splaveniny se dočasně převede do určeného prostoru pro usazování (louka, slepé rameno, vytěžený lom) nebo do jiného povodí [4].

5 UMĚLÝ TRANSPORT SPLAVENIN PŘES VD NOVÉ HEŘMINOVY

Výstavbou VD Nové Heřminovy bez dodatečných opatření dojde k usazení veškerých dnových splavenin a části plavenin v nádrži. Dojde tedy k postupnému zmenšování objemu nádrže, vzniku hladové vody pod nádrží a vytvoří se splaveninová diskontinuita [7].

Pro zamezení splaveninové diskontinuity je navržen umělý transport dnových splavenin. Princip fungování umělého transportu splavenin [7]:

- usazení splavenin v usazovacím prostoru (UP) nad nádrží VD Nové Heřminovy,
- těžba usazenin z usazovacího prostoru,
- umělý transport usazenin (např. nákladními automobily),
- uložení usazenin do vymílacího prostoru pod VD Nové Heřminovy,
- vymílání usazenin ve vymílacím prostoru (VP), dochází k transformaci na splaveniny.

5.1 USAZOVACÍ PROSTOR SPLAVENIN

UP by měl v co největší míře zamezit vniknutí splavenin do prostoru nádrže, a tím zabránit zmenšování objemu nádrže. Tvary nánosů jsou podrobněji popsány v kapitole 4.1.

U VD Nové Heřminovy se uvažuje se značným rozkmitem hladiny vlivem povodňové vlny (PV). Na konci vzduť je šířka nádrže značná. Pokud by se usazování splavenin nechalo bez opatření, usazování by bylo nesystematické a jeho těžba by byla velmi obtížná a nákladná [7].

Usazovací prostor splavenin je umístěn mezi mostem na Milotice a nově navrženou silnicí I/45 a je využito přirozeného meandru řeky Opavy.

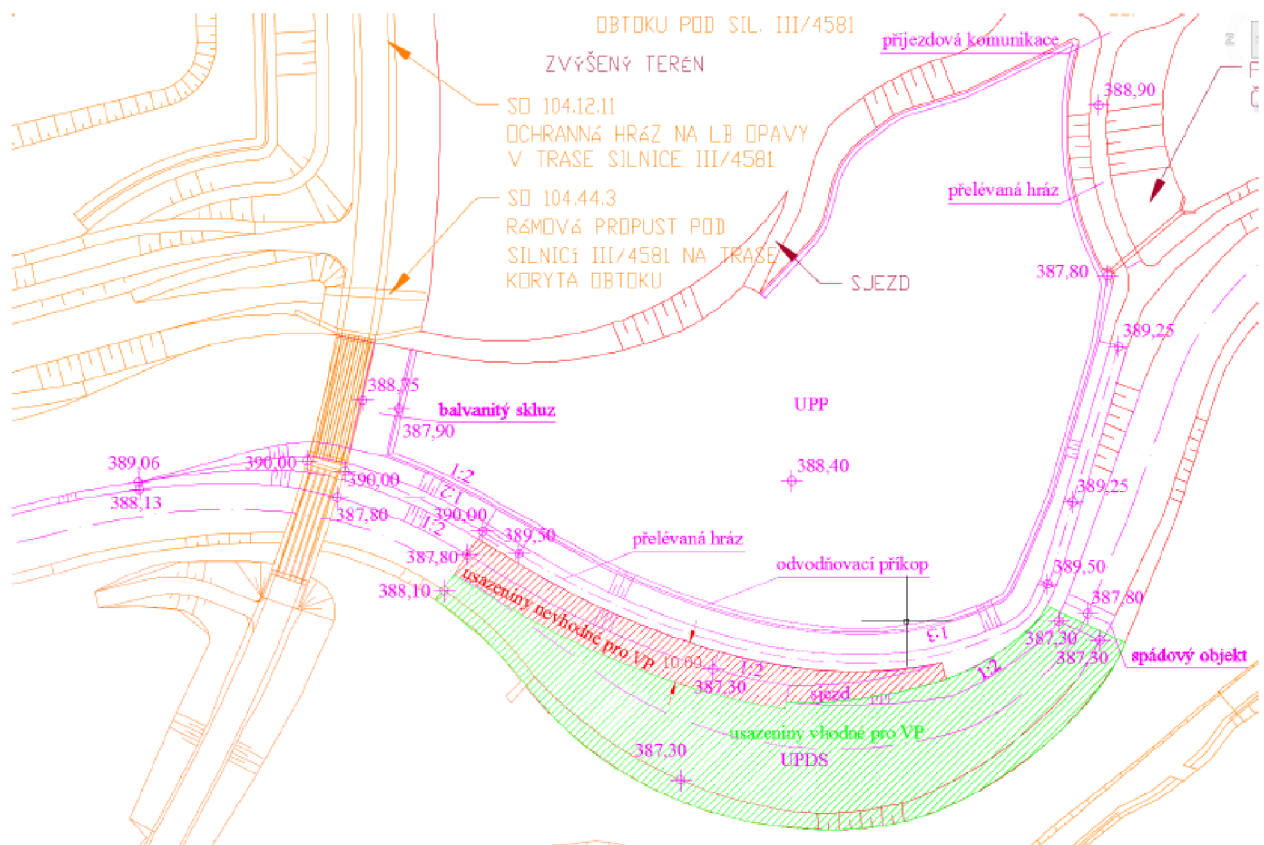
Před usazovacím prostorem má koryto tvar složeného lichoběžníku (kynety a bermy). Při proudění splavenin se předpokládá, že kynetou budou proudit dnové splaveniny a část plavenin. Bermou budou proudit pouze plaveniny. Proud vody mezi kynetu a bermu bude rozdělen pilířem mostu na Milotice.

Usazovací prostor splavenin bude rozdělen na dva samostatné prostory [7]:

- usazovací prostor dnových splavenin (UPDS), kde bude docházet k usazování dnových splavenin a části plavenin s lokalizací místa usazování a s tříděním částic (vhodné do VP), dojde ke značnému zlevnění těžby, těžba se bude muset provádět poměrně často a to po každé významné PV,

- usazovací prostor plavenin (UPP), kde dojde k usazení plavenin, i organického původu (nevhodné do VP), těžba se nebude muset provádět tak často jako u UPDS.

Aby nedocházelo k opětovnému odnosu usazenin z UPDS, při všech relevantních PV, byla navržena přelévaná dělicí hráz mezi oběma prostory. Šířka přelévané hráze v koruně je 4 m se sklonem 1:2 a v části UPP 1:3. Do obou prostorů jsou navrženy sjezdy. Na začátku a konci UPP a na konci UPDS je navržen spádový objekt [7].



Obr. 5.1 Usazovací prostor splavenin VD Nové Heřminovy [7]

6 1D MODEL TRANSPORTU SPLAVENIN

Pro 1D model transportu splavenin byl použit software HEC-RAS verze 5.0.3.

6.1 HEC-RAS

Program HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) slouží k tvorbě 1D modelů a od verze 5.0 je možnost tvorby 2D modelů zatím s omezenými možnostmi využití. V programu HEC-RAS se dají řešit následující typy úloh [5]:

- proudění vody (ustálené, neustálené),
- transport sedimentů,
- kvalita vody.



Obr. 6.1 Ikona programu HEC-RAS [5]

Výpočet proudění vody je popsáno v kapitole 3.9.

6.2 Vstupní data a podklady

Seznam vstupních podkladů poskytnutých firmou AQUATIS a. s. se svolením Povodí Odry, s. p.:

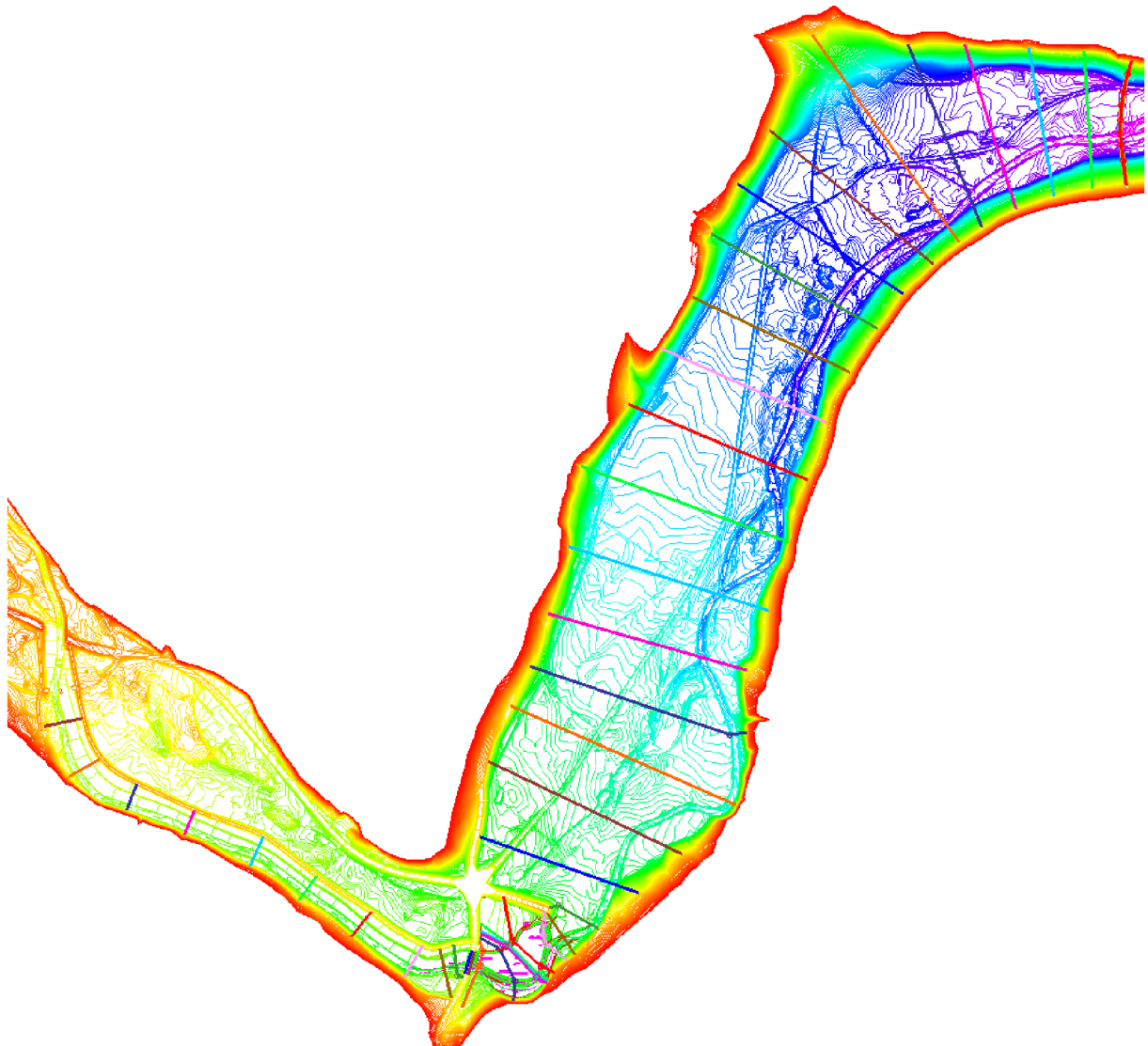
- digitální model terénu stávajícího a návrhového stavu,
- hydrologická data,
- studie související s transportem splavenin v daném úseku,
- zrnitostní křivka.

Dále byla provedena osobní prohlídka lokality a pořízení fotografií.

Digitální model terénu

Hlavním podkladem byl 3D model stávajícího a návrhového stavu terénu v programu Surface-water Modeling System (SMS) [19]. Aby bylo možné vytvořit 1D model v programu HEC-RAS, bylo třeba zaznačit v 3D modelu příčné profily. Profily byly voleny tak, aby co nejvíce charakterizovaly koryto stávajícího a návrhového toku včetně všech objektů. Profily byly následně vyexportovány do textového souboru. Soubor obsahoval hodnoty číselného označení profilu, staničení a hodnoty nadmořských výšek. Hodnoty byly

následně použity při tvorbě modelů v programu HEC-RAS. 3D model s profily je zobrazen na Obr. 6.2.



Obr. 6.2 3D modelu návrhového stavu se zvolenými příčnými řezy v programu SMS [7]

Osobní obhlídka terénu

Osobní obhlídka terénu proběhla dne 23. 7. 2016. Bylo pořízeno více než 150 fotografií zachycující tok a jeho blízké okolí. Pořízené fotografie následně sloužily ke stanovení součinitele drsnosti svahů koryta a inundačního území. Některá místa byla bohužel obtížně dostupná, proto byla použita letecká mapa a fotografie dostupné na internetu [14]. Na následujících obrázcích jsou vybrané fotografie toku Opava a dnové dlažby na dně koryta.



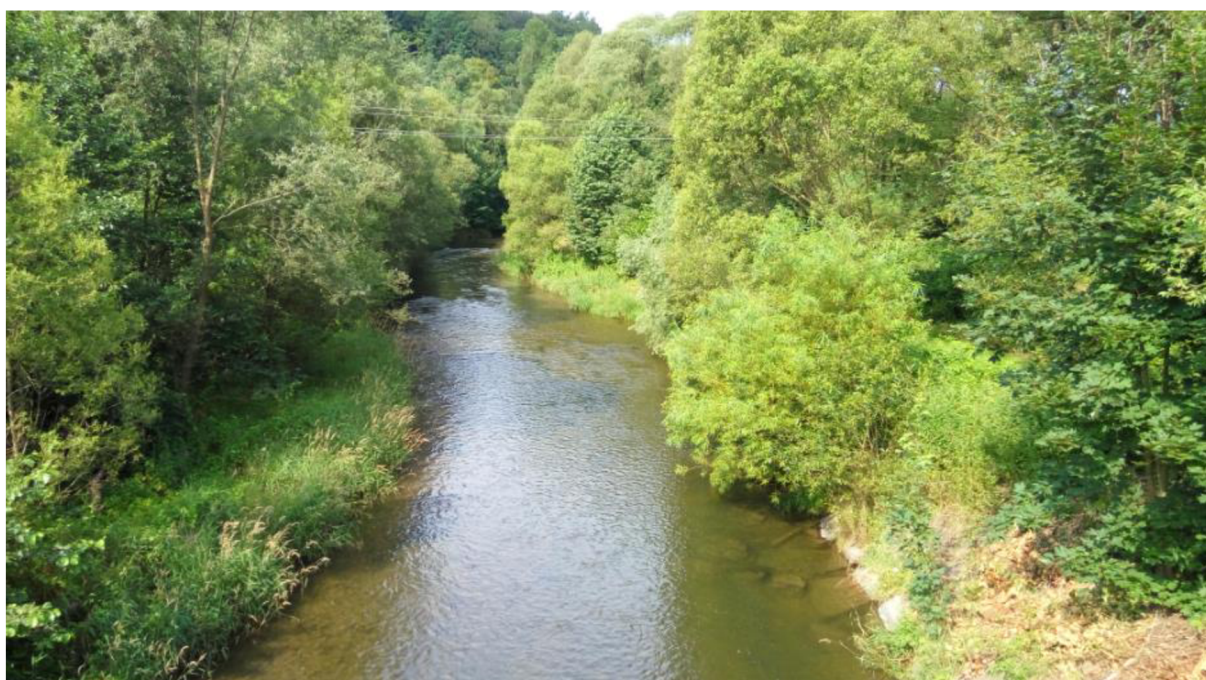
Obr. 6.3 Pohled na řeku Opavu po proudu – v modelu cca km 4,196



Obr. 6.4 Dnová dlažba v toku Opava (2016) – v modelu cca km 3,555



Obr. 6.5 Dnová dlažba v toku Opava (2016) – v modelu cca km 3,151



Obr. 6.6 Pohled z mostu silnice 4581 proti proudu – v modelu km 2,089

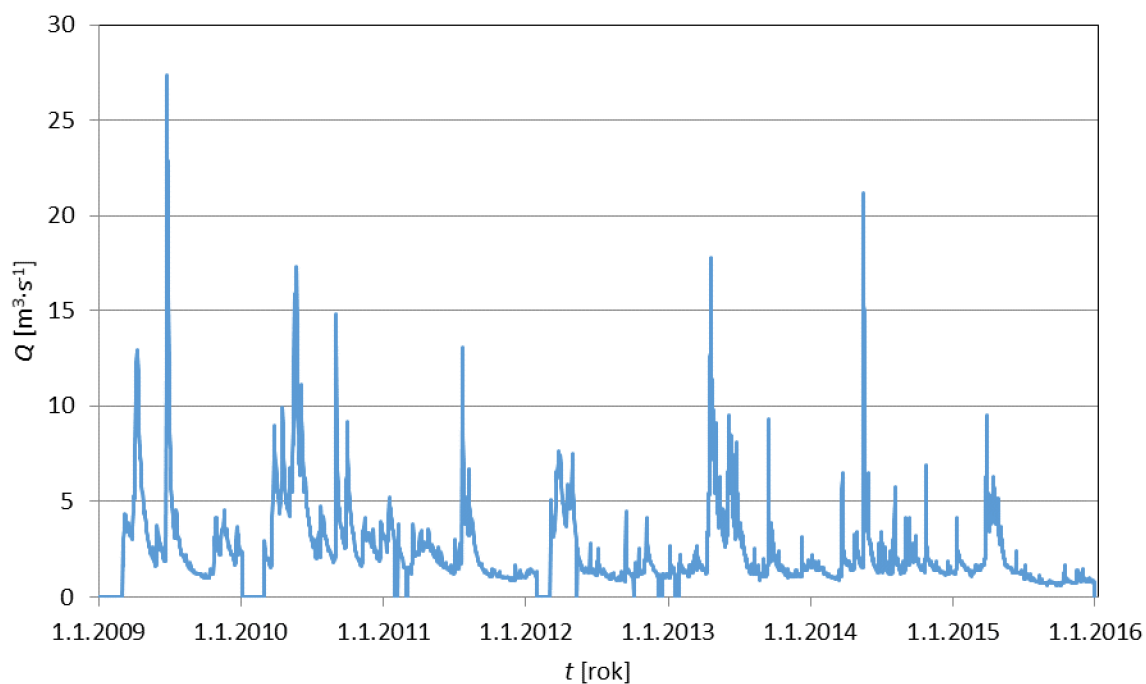
Hydrologická data

Pro výpočet byly použity m-denní průtoky uvedené v Tab 2.1, hodnoty v rozsahu 1 až 20 byly dopočteny extrapolací pomocí logaritmické závislosti na průměrném ročním průtoku Q_a a dat stanovených ČHMÚ. Hodnota Q_a je $3,50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Tab. 6.1 Extrapolované m-denní průtoky Q_m [6]

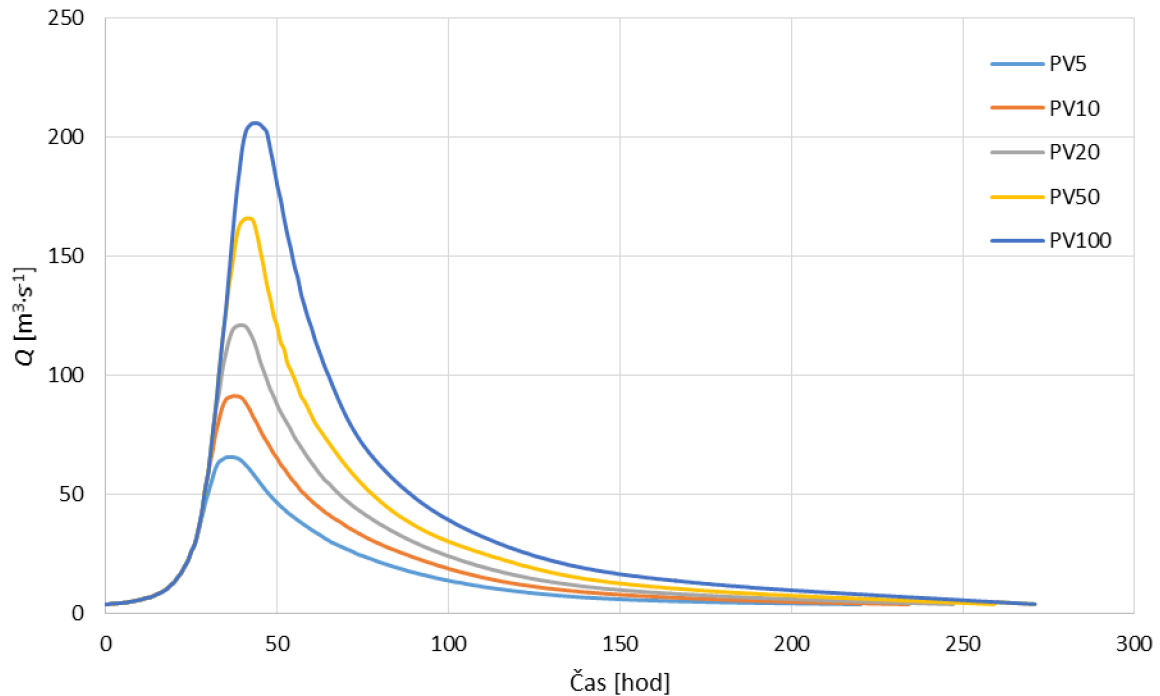
extrapolované m-denní průtoky Q_m [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]				
1	2	5	10	20
29,53	22,29	15,61	12,23	9,33

Dalšími hydrologickými daty byla průtoková řada v obci Karlovice v letech 2009 – 2015 (Obr. 6.7). Obec Karlovice je vzdálená od obce Nové Heřminovy přibližně 13 km.



Obr. 6.7 Hydrologická data v obci Karlovice v letech 2009 – 2015 [7]

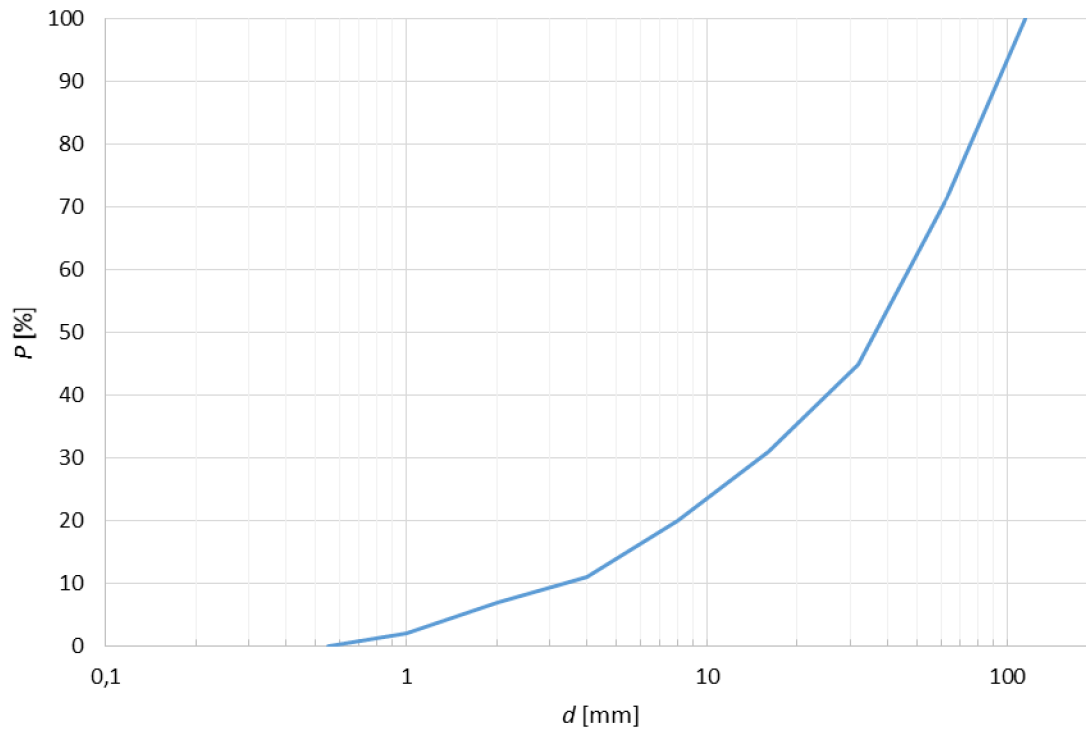
Posledním hydrologickým podkladem byly povodňové vlny PV₅, PV₁₀, PV₂₀, PV₅₀, PV₁₀₀. PV jsou zobrazeny na Obr. 6.8.



Obr. 6.8 Povodňové vlny [7]

Zrnitostní křivka

V oblasti proběhlo několik odběrů a vyhodnocení zrnitosti dna. Poslední odběr proběhl v listopadu roku 2015. Vyhodnocení zrnitostních křivek probíhalo na normové sadě sít. Pro výpočet byla použita náhradní zrnitostní křivka krycí vrstvy dna (Obr. 6.9), aproximována z dlouhodobého pozorování [7].



Obr. 6.9 Zrnitostní křivka stanovená z dlouhodobého pozorování

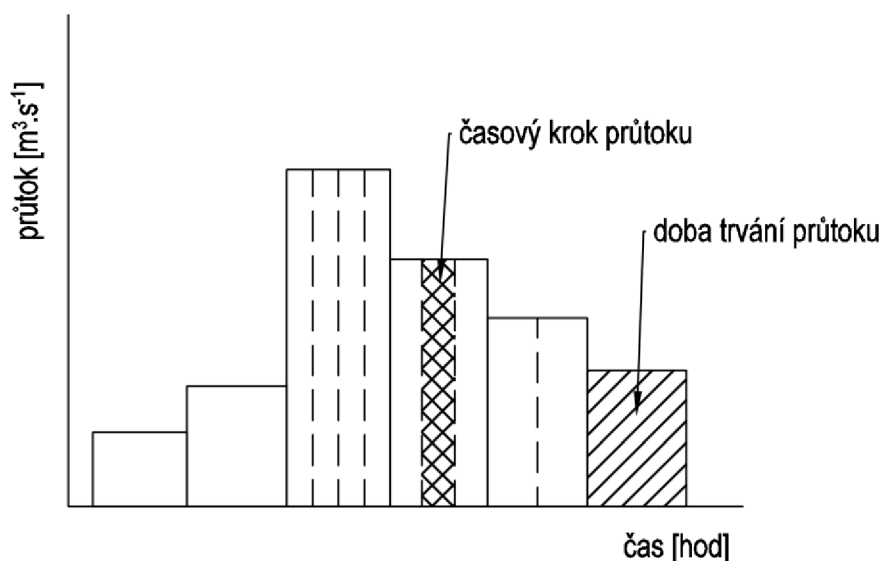
6.3 Modul transportu sedimentů

Transport sedimentů lze řešit dvěma způsoby:

- po částech ustáleně,
- neustáleně.

Po částech ustálené proudění

Po částech ustálené proudění je vhodné pro dlouhodobou analýzu transportu sedimentů. Hydrodynamický model proudění simuluje průtokovou řadu sérií výpočtů ustáleného proudění. Hydrodynamické parametry pro model sedimentů jsou spočítány pomocí ustáleného proudění a užity modulem transportu splavenin.



Obr. 6.10 Po částech ustálené proudění [5]

Neustálené proudění

Neustálené proudění pro transport sedimentů je novinka od verze programu HEC-RAS 5.0. Prvním krokem je vytvořit si přesný, kalibrovaný a stabilní hydraulický model v neustáleném proudění a poté vybrat vhodný výpočet sedimentů. Modelování v neustáleném proudění vyžaduje uživatele se značnou mírou opatrnosti a zkušenostmi z důvodu možnosti nestability výpočtu v případě vzniku dnové dlažby. Vytvořit plně funkční stabilní model v neustáleném proudění je obtížné [5].

Při řešení diplomové práce je plně využíváno modulu pro transport sedimentů s po částech ustáleným prouděním a to z důvodu větší stability a rychlosti výpočtu.

6.4 Sedimentační data a možnosti nastavení

Transportní funkce

Výběr správné transportní funkce není jednoduchý. Jednotlivé funkce mají nelineární průběh a výsledné hodnoty proto mohou být velmi rozdílné. Je třeba dávat pozor na hydraulické podmínky a velikosti zrn, pro které byla metoda vyvinuta.

Ve verzi programu 5.0 je na výběr z následujících vztahů pro výpočet kapacity průtoku splavenin s rozsahem jejich platnosti [5]:

Tab. 6.2 Transportní funkce s rozsahem platnosti dostupné v programu HEC-RAS

Autor	d_e		d_m		v		h		i	
	od	do	od	do	od	do	od	do	od	do
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[m/s]	[m/s]	[m]	[m]		
Ackers-White	0,04	7			0,021	2,164	0,003	0,427	0,00006	0,037
England-Hansen			0,19	0,93	0,198	1,932	0,058	0,405	0,000055	0,019
Laursen			0,011	29	0,021	2,865	0,009	16,459	0,0000021	0,0018
Meyer-Peter a Müller	0,4	29			0,366	2,865	0,009	1,189	0,0004	0,020
Toffaletti	0,062	4	0,095	0,91	0,213	2,377	0,021	17,282	0,000002	0,019
Yang	0,15	7			0,244	1,951	0,012	15,240	0,000043	0,029

Pro výpočet proudění splavenin v Opavě byla vybrána rovnice Meyer-Petera a Müllera (MPM), která byla jednou z nejdříve odvozených a je stále nejvíce používána. Rovnice je popsána v kapitole 3.10. Experiment při odvození se odehrával ve žlabu s pískem a štěrkem s urovnaným dnem na počátku experimentu. Transportní rovnice nejlépe postihuje štěrkonosné toky a v případě jemnějších materiálů mírně podhodnocuje výsledky [5].

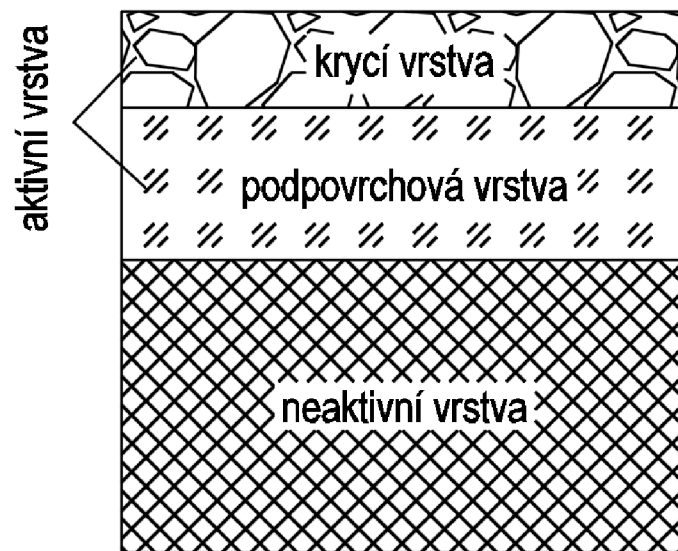
Metoda třídění zrn

Dostupné metody třídění částic v programu HEC-RAS jsou [5]:

- Thomas (Exner 5),
- Copeland (Exner 7),
- Active Layer.

Na Obr. 6.11 je zobrazen třívrstvý model dle Tomase odvozený pro statické armování. Pro výpočet byl použit z důvodu vyvinuté krycí vrstvy v řece Opavě. Dno je rozděleno na aktivní a neaktivní vrstvu. Aktivní vrstva je dále rozdělená na krycí a podpovrchovou vrstvu. Zrnitostní složení aktivní vrstvy odpovídá zrnitostnímu složení transportovaných splavenin. V krycí vrstvě probíhá vymílání a zanášení. Před každým krokem je tloušťka

krycí vrstvy vypočítána z velikosti částice v krycí vrstvě a podpovrchová vrstva je složena z materiálu z neaktivní vrstvy [5].



Obr. 6.11 Třídění částic dle Thomase (Exner 5)

Usazovací rychlost

Dostupné metody výpočtu usazovací rychlosti jsou [5]:

- Ruby,
- Toffaleti,
- Van Rijn,
- Dietrich,
- Report 12.

Pro výpočet byla vybrána metoda výpočtu dle Van Rijna, protože platí pro podobný tvar částic, jako jsou částice v daném úseku toku. Rovnice jsou popsány v kapitole 3.11.

Maximální prohloubení

Modul sedimentů umožňuje zadat pro každý příčný profil maximální prohloubení případně minimální hloubku dna v nadmořské výšce. Pro model bylo využíváno maximálního prohloubení. Byla zvolena hodnota 2 metru s ohledem na průměrnou hloubku skalního podloží v dané lokalitě [7].

Zrnitostní křivka

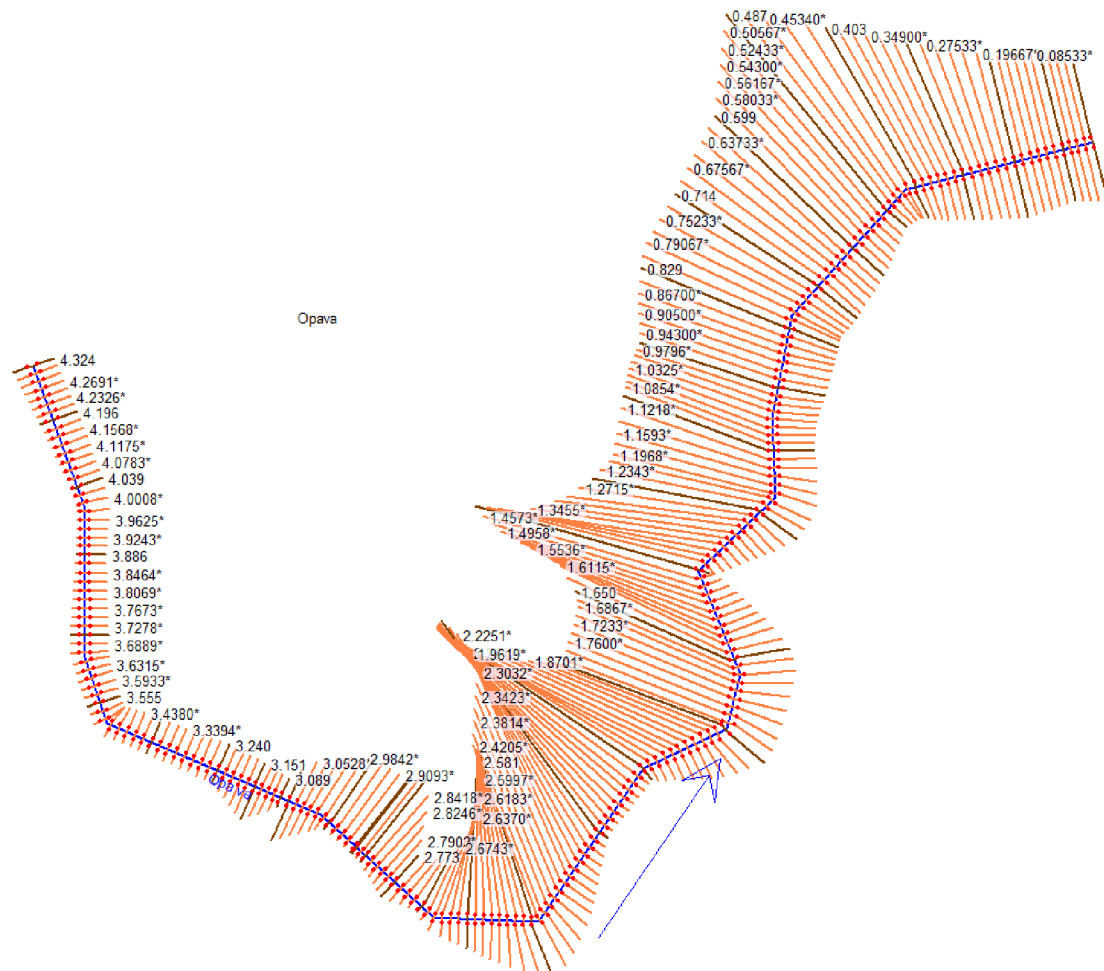
Do programu je možno zadat několik zrnitostních křivek. Křivku lze zadat dvěma způsoby. Zastoupením jednotlivých frakcí částic nebo procentuálním propadem částic určité velikosti. Zrnitost lze následně třeba přiřadit jednotlivým příčným řezům. Do všech modelů byla přiřazena zrnitostní křivka z kapitoly 6.2, která byla aproximována z dlouhodobého pozorování [7].

Okrajová podmínka

Program umožňuje zvolit několik okrajových podmínek s možností volby staničení. Vybrat lze přítok splavenin v závislosti na velikosti průtoku, přítok splavenin v závislosti na časovém kroku, rovnoměrný transport splavenin a další. Rovnoměrný transport splavenin je vypočítán ze zrnitostní křivky a transportní kapacity. Program HEC-RAS vypočítává hodnotu pro každý časový krok a frakci zvlášť a používá ji následně pro výpočet rovnice spojitosti splavenin v následujícím řezu. Pro výpočty byl zvolen rovnoměrný transport splavenin vypočtený ze zrnitostní křivky (kapitola 6.2). Okrajová podmínka byla zadána v profilu km 4,324.

6.5 Model stávajícího stavu

V programu HEC-RAS byla vytvořena osa toku a geometrická data příčných profilů se staničením vyexportovaných z 3D modelu. Celková délka úseku modelu byla 4,324 km. Následně bylo třeba upravit vzdálenosti mezi jednotlivými profily na skutečné hodnoty. Profily byly rozděleny na koryto a inundační území. Součinitel drsnosti pro dno byl stanoven dle Stricklera, u povrchů s vegetačním pokryvem byl stanoven na základě osobní pochůzky a pořízených fotografií a z tabulek. Výpočtová hodnota drsnosti pro dno dle Stricklera byla $n_d = 0,030$. Drsnosti v inundačním území byla od hodnoty 0,065 – 0,080. Po přípravě všech příčných profilů byla provedena interpolace doplňujících příčných profilů po maximální vzdálenosti 20 m. Součinitele místních ztrát byly ponechány dle doporučení výrobce. Na Obr. 6.12 je zobrazena situace stávajícího stavu.



Obr. 6.12 Situace stávajícího stavu v programu HEC-RAS

6.5.1 Kalibrace a testy modelu

V této kapitole je popsána kalibrace a testování nastavení programu HEC-RAS na modelu stávajícího stavu.

Hustota částic je programem HEC-RAS aplikována pro všechny částice stejná a její hodnota byla nastavena na $2650 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Tvarový součinitel částice má hodnotu 0,6 a je využíván pouze u výpočtu usazovací rychlosti dle Report 12. Objemová hmotnost písku a štěrku je $1489 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, pro prach $1041 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a pro jílu je hodnota $480 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Zanášení příčného profilu je umožněno i mimo zvolenou část dna. Eroze je mimo zvolenou část dna omezena a k usazování může docházet v celém omočeném obvodu. Dělení částic na frakce bylo ponecháno dle původního nastavení programu. Pro proudění splavenin byla vybrána metoda MPM popsána v kapitole 3.10. MPM je v programu HEC-RAS zjednodušena na tvar [5]

$$q_s = a \cdot (\tau^* - \tau_c^*)^b, \quad (6.1)$$

kde τ^* je bezrozměrné napětí pro danou částici, τ_c^* kritické bezrozměrné napětí pro danou částici má hodnotu 0,045, q_s specifický hmotnostní průtok, a a b jsou koeficienty, které nahrazují původní rovnici (3.38). Hodnoty jsou $a = 8$ a $b = 1,5$. Další kalibrace modelu probíhala testováním váhových součinitelů pro výpočet sedimentů. Při nastavení váhových součinitelů ovlivňujících hydraulické vlastnosti v závislosti na frakci na hodnoty 0,25/0,5/0,25, kde součinitelé charakterizují vliv horního profilu, současného profilu a dolního profilu. Začalo docházet k „zazubení“ dna, proto hodnoty byly nastaveny na 0/1/0. Současný profil nebyl hydraulicky ovlivněn horním ani dolním profilem a došlo k odstranění zazubení ve dně. Dále je možno nastavit váhové součinitele pro horní a dolní profil, kdy lze ovlivnit vliv horní a dolní okrajové podmínky. Tyto součinitelé byly ponechány dle nastavení výrobce. Lze nastavit minimální hodnotu změny dna v profilu pro přepočítání příčného profilu a jeho hydraulických parametrů. Sklon čáry mechanické energie pro transport sedimentů lze vypočítat dvěma způsoby. Z průměrného sklonu čáry mechanické energie nebo ze sklonu čáry mechanické energie v daném profilu. Při testování se ukázal průměrný sklon čáry energie jako stabilnější.

Posledním nastavením je nastavení obsahu výstupního souboru. Výsledky mohou být v 6. úrovních, kdy 1. úroveň obsahuje nejméně výsledků a 6. úroveň veškeré výsledky, které je program HEC-RAS schopen vypočítat. Obsah jednotlivých úrovní lze nalézt v manuálu programu [5]. Výsledky mohou být vyjádřeny v jednotkách hmotnosti nebo objemu. Aby nebylo ve výstupním souboru příliš hodnot, je možno zvolit časový krok výstupu (hodiny, dny, délka výpočtového kroku a doba trvání průtoku) nebo zapsat hodnotu specifikovanou v tabulce. Po otestování všech možných variant byla zvolena 6. úroveň výsledků v jednotkách objemu. Časový krok výstupu byl zvolen dle doby trvání jednotlivých průtoků.

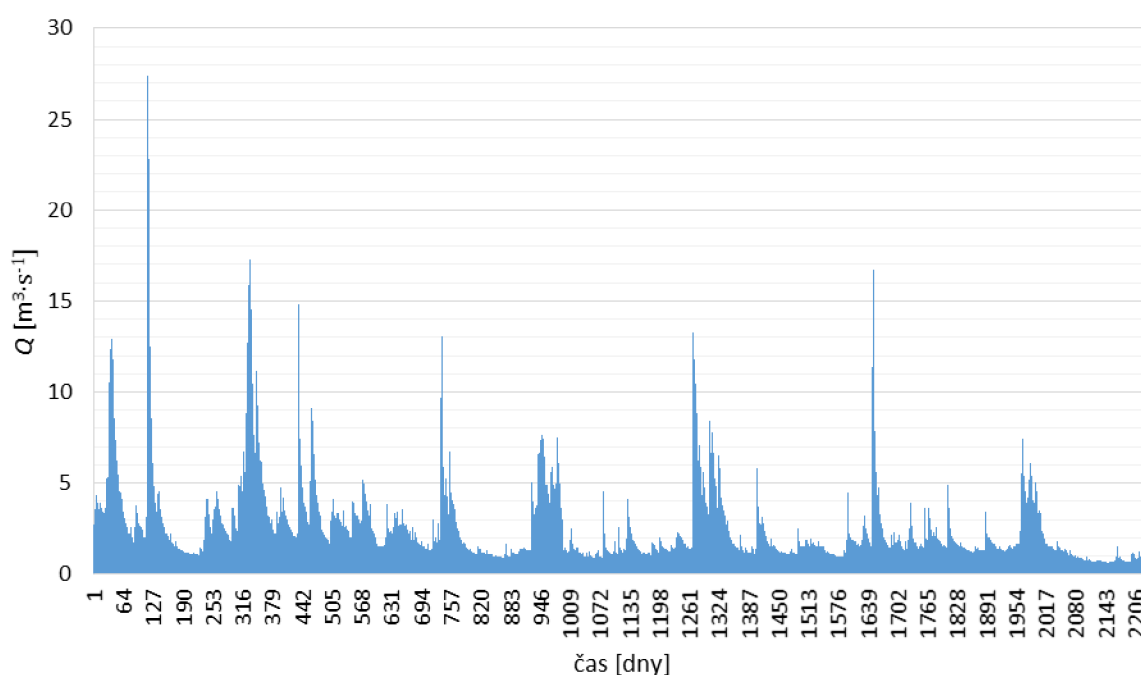
6.5.2 Kalibrace a testy hydrodynamického modelu

První fází kalibrace modelu bylo simulování průtoků Q_5 , Q_{10} , Q_{20} , Q_{50} , Q_{100} , aby se zjistilo, jestli nedochází k překryvům průběhu hladin, což by mohlo způsobovat nestabilitu při výpočtu. K překryvům docházelo především v těch částech, kde povrch inundačního území byl níže než horní hrany břehů koryta. Proto bylo třeba některé profily geometricky upravit, aby nedocházelo k problémům při výpočtu. Rovněž bylo třeba upravit dobu výpočtového kroku, která byla nově funkcí průtoku.

Druhou fází kalibrace hydrodynamického modelu byla kalibrace na kapacitu koryta, která je odhadována v daném úseku mezi Q_1 až Q_5 . Ukázalo se, že nastavený součinitel drsnosti bylo třeba zvětšit až na hodnotu $n_d = 0,036$, což odpovídá hodnotě určené studií [6].

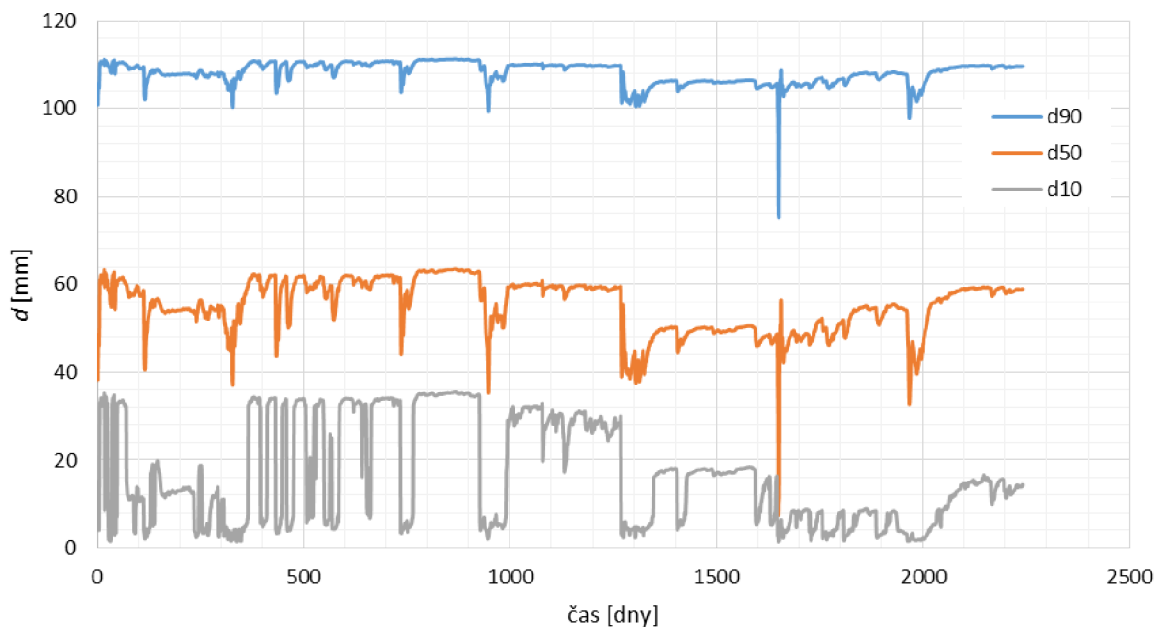
Kalibrace a testy modelu sedimentů

Částečná kalibrace modelu sedimentů byla provedena na vývoj krycí vrstvy. Simulován byl vývoj krycí vrstvy toku. Jako vstupní hydrologická data byly použity průtoky z let 2009 – 2015 (Obr. 6.7). Z hodnot průtoku byly odstraněny nulové průtoky (neměřeno), protože s nimi program HEC-RAS nepočítá. Na Obr. 6.13 je zobrazena upravená průtoková řada 2009 – 2015, jednalo se o 2242 dnů.

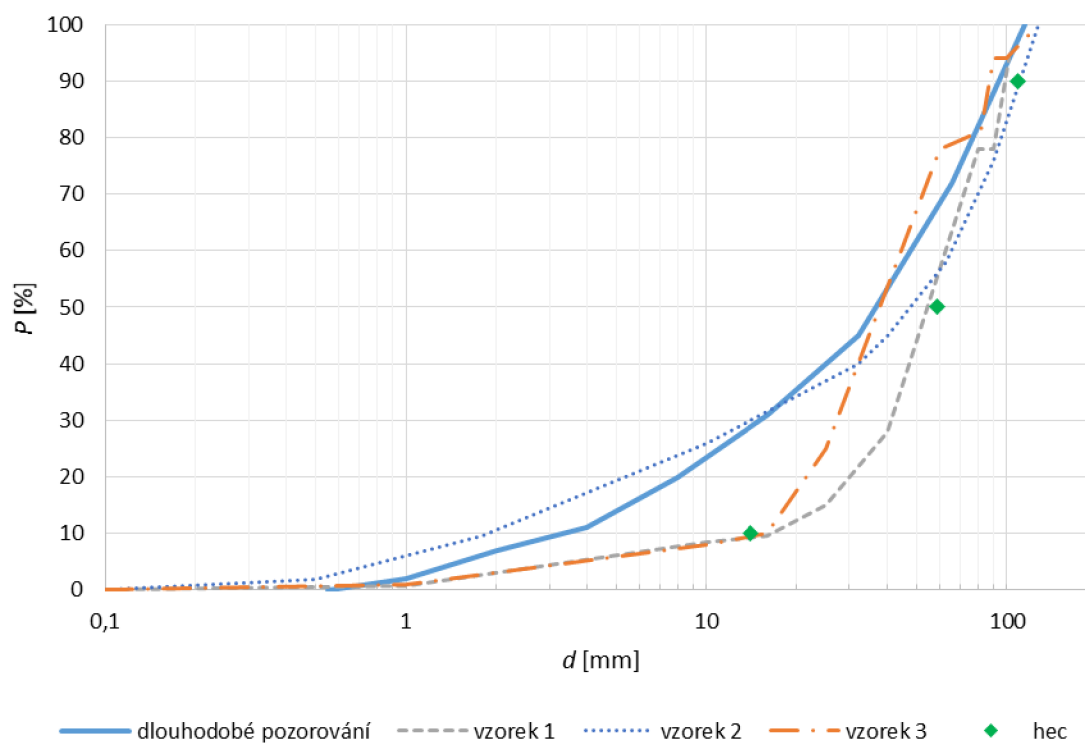


Obr. 6.13 Upravená průtoková řada pro vývoj krycí vrstvy

Z výsledků byla odečtena data pro profil v km 2,890. Data byla následně vynesena do grafické podoby a porovnána se známými zrnitostními křivkami z roku 2015 [7]. Na Obr. 6.14 lze vidět, že v krycí vrstvě na konci roku 2015 se velikost částic d_{90} pohybuje kolem 109 mm, u d_{50} je velikost částic 59 mm a při d_{10} je velikost částice 14 mm. Z grafu vyplývá, že nedošlo k celkovému porušení krycí vrstvy, ale pouze k jejímu vytřídění, což potvrzuje pozorování. Výsledné zrnitostní složení krycí vrstvy přibližně odpovídá reálným zrnitostním křivkám, zobrazeným na Obr. 6.15. Výsledky ukázaly, že velikost částic v krycí vrstvě v průběhu roku kolísá. Simulace vývoje krycí vrstvy proběhla úspěšně a program HEC-RAS je vhodný pro další výpočty.



Obr. 6.14 Vývoj krycí vrstvy v km 2,890

Obr. 6.15 Zrnitostní křivky krycí vrstvy dna (3x odebrané vzorky + dlouhodobé pozorování) [7] a zobrazení zrnitostí d_{10} , d_{50} a d_{90} z programu HEC-RAS v km 2,890

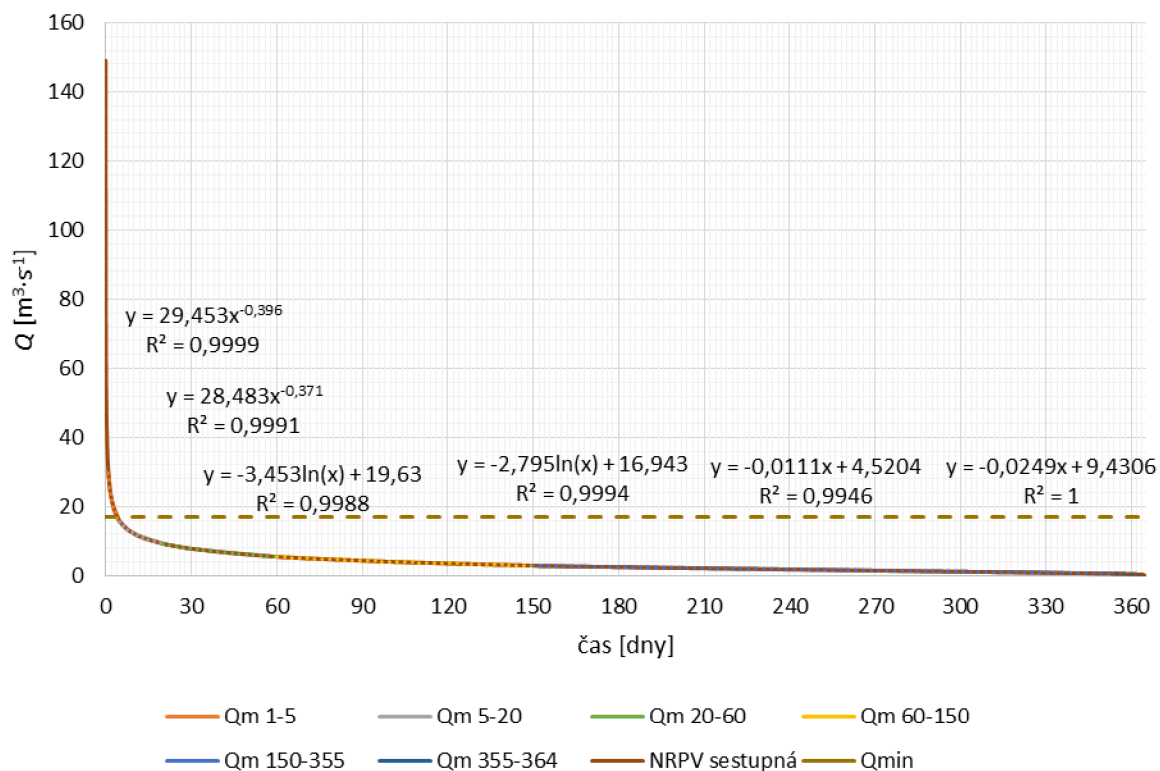
Model stávajícího stavu byl dále testován na stabilitu při PV_5 , PV_{10} , PV_{20} , PV_{50} , PV_{100} . Při simulaci jednotlivých PV model vykazoval nestability způsobené zanášením některých

profilů, proto bylo třeba upravit rozsah vymílání. Testovány byly rovněž způsoby výpočtu sklonu čáry mechanické energie a maximální hloubka vymílání. Vzhledem k výsledkům však byly ponechány přednastavené výrobcem softwaru.

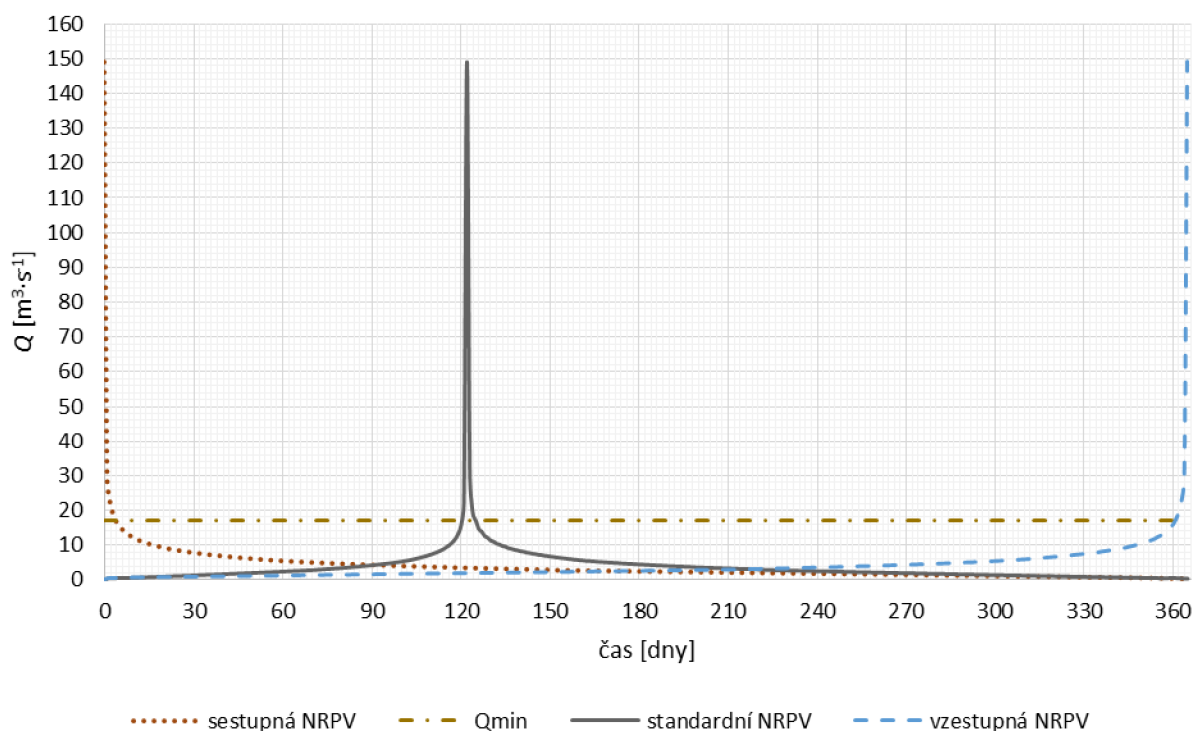
Počáteční pohyb splavenin byl kontrolován s výpočtem rovnoměrného proudění dle postupu popsaného v kapitole 3.8.1. Ze zrnitostní křivky (Obr. 6.9) byla vypočítána dle rovnice (3.2) hodnota efektivního zrna $d_e = 0,060$ m. Teplota vody byla předpokládána 7,5 °C. Hodnota hustoty vody a kinematické viskozity byly interpolovány z Tab. 3.2. Hustota částic byla zvolena s ohledem na zrnitostní křivku 2650 kg·m⁻³ s úhlem vnitřního tření 40°, průměrný sklon v celém úseku je $i = 0,5$ % a tíhové zrychlení $g = 9,81$ m·s⁻². Následně byl vytvořen synoptický řez příčných profilů a s pomocí ustáleného rovnoměrného proudění vypočítán průtok $Q_{min} = 17,13$ m³·s⁻¹, při kterém je dosaženo počátku pohybu splavenin. Veškeré výpočty pak byly provedeny až při dosažení či překročení tohoto průtoku. Průtok se prakticky shodoval s průtokem stanoveným 1D modelem, což potvrdilo správnost výpočtu počátku pohybu splavenin programem HEC-RAS při použití pouze jednoho reprezentativního zrna.

Tvorba návrhových ročních průtokových vln

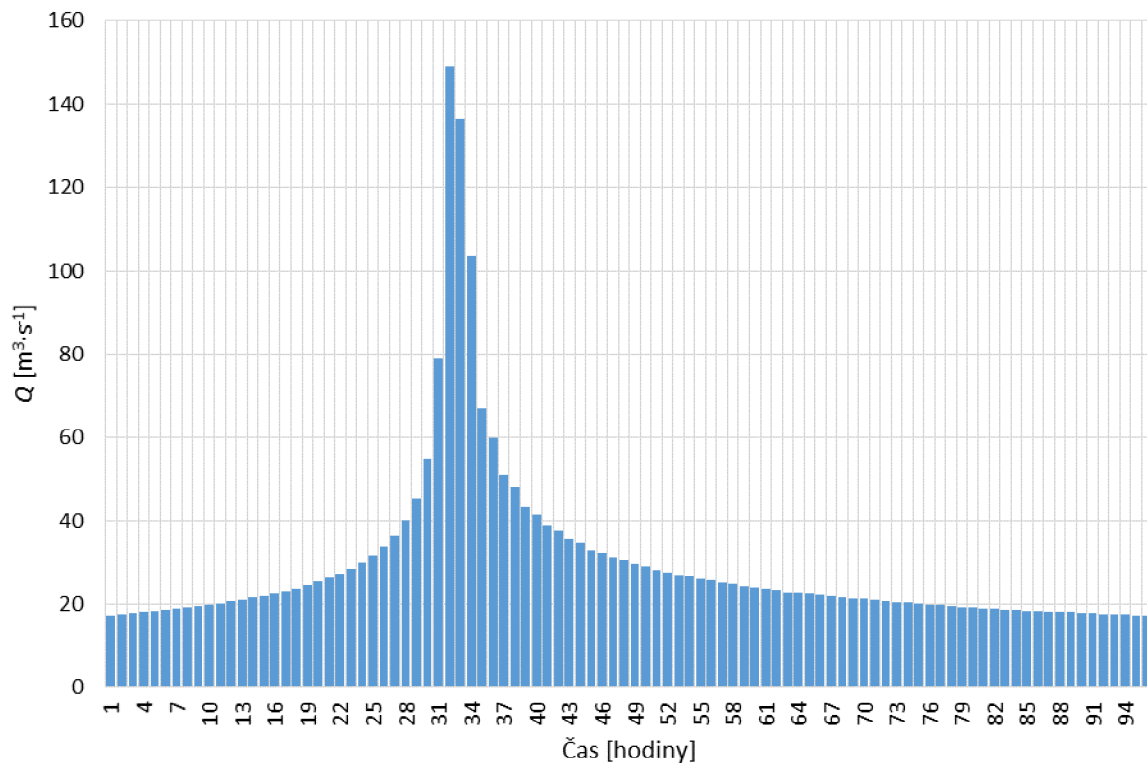
Z hodnot m-denních průtoků (Tab. 2.1) a hodnot extrapolovaných m-denních průtoků (Tab. 6.1) byly extrapolovány chybějící mezihodnoty (Na Obr. 6.16 jsou zobrazeny rovnice s hodnotou jejich spolehlivosti R). Extrapolované hodnoty byly následně transformovány a vytvořeny 3 varianty návrhových ročních průtokových vln (NRPV). Standardní, vzestupná a sestupná NRPV (Obr. 6.17).



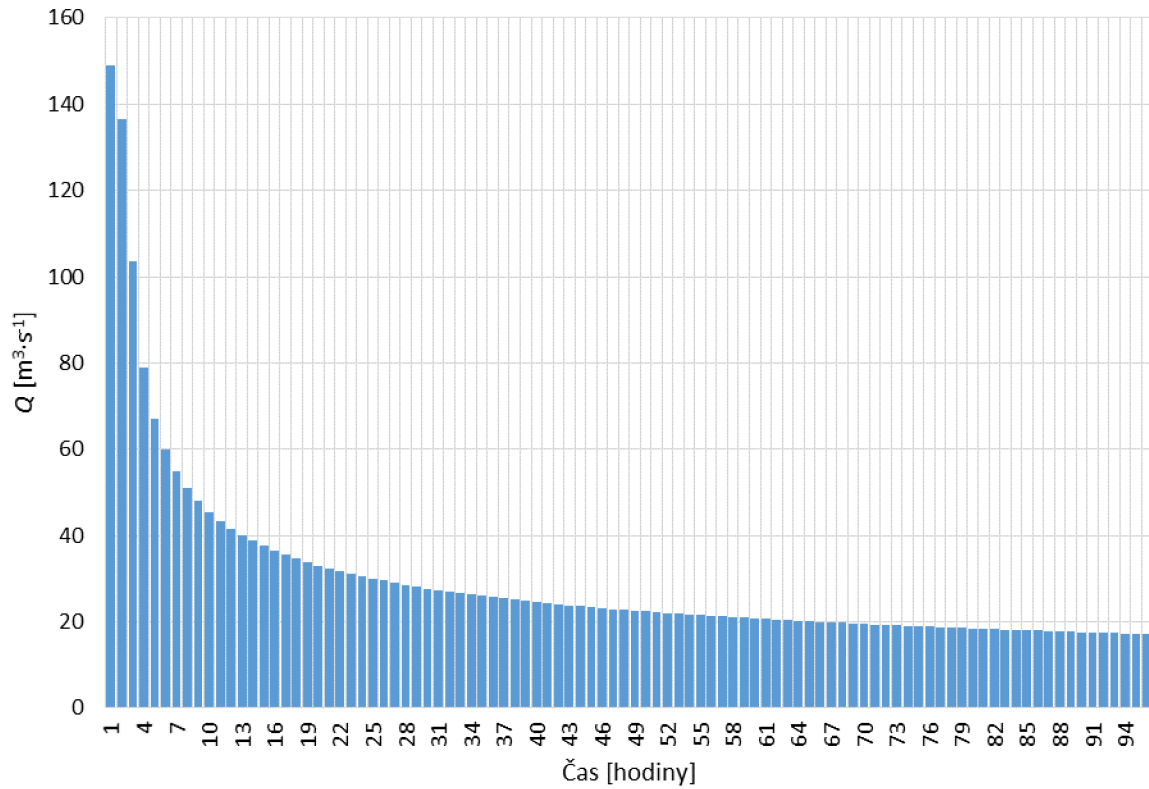
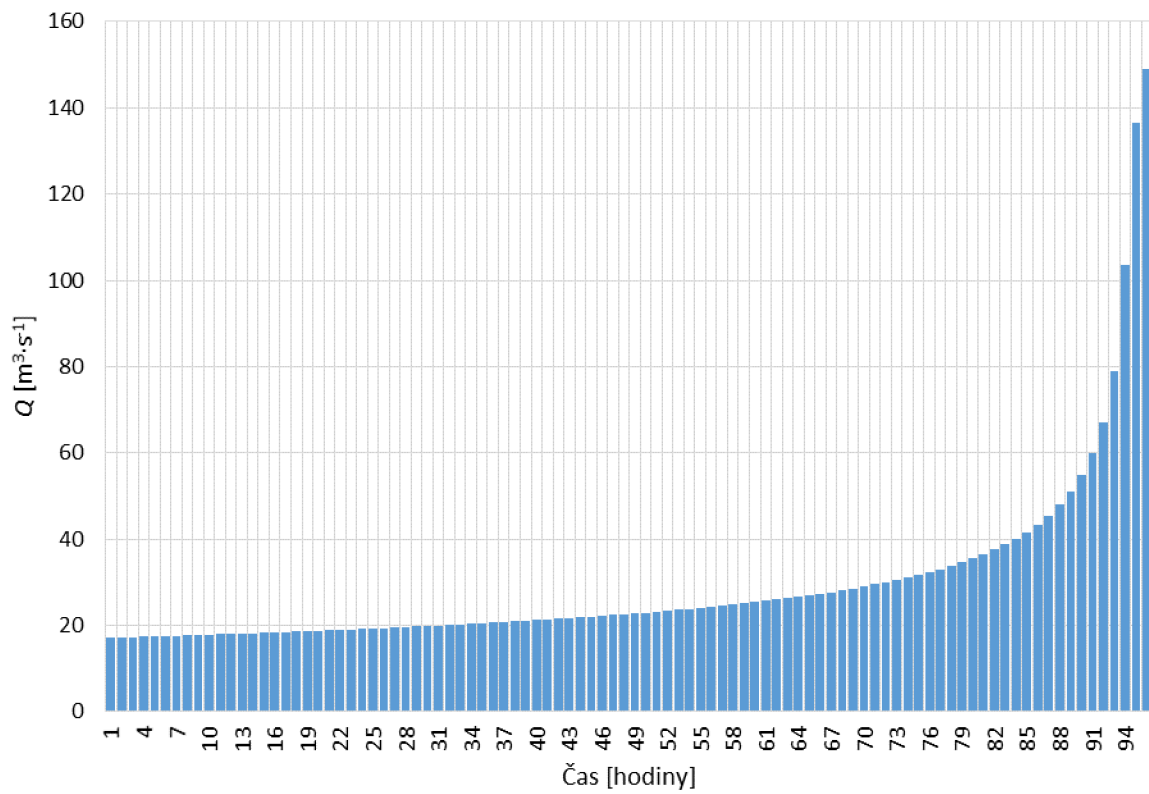
Obr. 6.16 Extrapolované hodnoty m-denních průtoků, výpočtové rovnice a hodnota spolehlivosti R

Obr. 6.17 Extrapolované průtoky NRPV (3 varianty) a průtoku Q_{min}

NRPV byly následně časově omezeny rozsahem s transportem sedimentů, hodnotou počátečního pohybu splavenin spočítanou v předchozí kapitole. Na následujících obrázcích jsou uvedeny 3 varianty NRPV, které byly použity při výpočtech.



Obr. 6.18 Standardní NRPV

*Obr. 6.19 Sestupná NRPV**Obr. 6.20 Vzestupná NRPV*

6.6 Model bez umělého transportu splavenin

Pro výpočet zanášení nádrže byla provedena úprava stávajícího kalibrovaného modelu. Model je dále označován zkratkou BUP. Změněna byla dolní okrajová podmínka, která odpovídala nejpravděpodobnější úrovni hladiny v nádrži při daném průtoku. Dolní okrajovou podmínkou byla hladina zásobního prostoru nádrže 382,40 m n. m. z Obr 2.8 do průtoku $Q = 100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a při větších průtocích dle výsledků transformace povodňových vln nádrží [7]. Geometrická data byla změněna pouze v km 3,151 – 4,324. Jednalo se o úpravu příčných řezů dle 3D modelu návrhového stavu (kapitola 6.2). Příčný profil byl rozdělen na kynetu a levostrannou bermu. Změna úrovně dna byla minimální, nedošlo tedy k ovlivnění stability výpočtu předchozího modelu. Drsnost ve dně zůstala na hodnotě 0,036 a drsnosti v inundačním území byly změněny na hodnoty v rozmezí 0,060 – 0,070.

6.7 Model s umělým transportem splavenin

Tvorba modelu návrhového stavu s usazovacím prostorem (dále SUP) probíhala úpravou modelu BUP. Byla změněna geometrie v úseku km 3,151 – 2,773, kde byly opraveny příčné profily charakterizující usazovací prostor. Drsnosti v usazovacím prostoru byly voleny v rozmezí 0,045 – 0,060. Horní okrajová podmínka zůstala stejná jako v předchozím modelu. V místě spádového objektu byly změněny hodnoty maximálního prohloubení na 0 m, protože se předpokládá, že bude vyroben z neerodovatelného materiálu.

6.8 Výstupní data

6.8.1 Průměrný roční průtok splavenin

Simulace pro stanovení průměrného ročního průtoku splavenin proběhla na sérii dvou NRPV puštěných za sebou z důvodu vytřídění krycí vrstvy po první NRPV. Byla stanovena nejnepříznivější varianta pro SUP a BUP, kterou byla v obou případech varianta sestupné NRPV. Hodnoty průtoku splavenin Q_s byly odečteny z příčného profilu v km 2,017 (zaústění toku do nádrže při zásobní hladině na konci prvního a druhého roku a výslednou hodnotou byl rozdíl těchto dvou hodnot (Tab. 6.3).

Tab. 6.3 Hodnoty Q_s při standardní, sestupné a vzestupné NRPV pro SUP a BUP v km 2,017

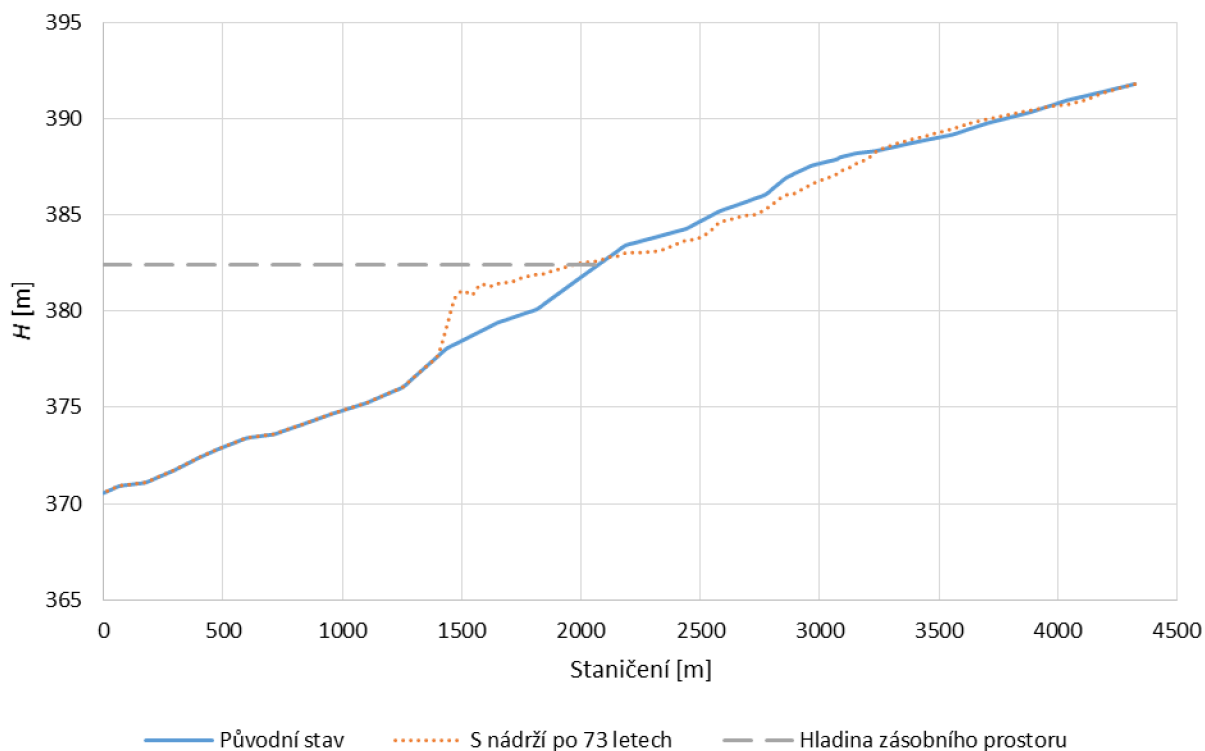
	SUP	BUP
	Q_s [$m^3 \cdot rok^{-1}$]	Q_s [$m^3 \cdot rok^{-1}$]
Standardní NRPV	252,64	2003,66
Sestupná NRPV	394,85	2204,93
Vzestupná NRPV	99,51	2033,00

Nejnepříznivější byla sestupná NRPV. Pro variantu SUP byla hodnota $Q_s = 394,85 m^3 \cdot rok^{-1}$ a pro variantu BUP byla hodnota $Q_s = 2\,204,93 m^3 \cdot rok^{-1}$. Jedná se maximální možné hodnoty. Pro výpočty dlouhodobého zanášení byla uvažována standardní NRPV. U standardní NRPV nedochází k náhlé změně průtoku a jednotlivé NRPV na sebe plynule navazují, přibližně odpovídají svým tvarem reálným PV a lépe postihují dlouhodobý vývoj.

6.8.2 Zanášení nádrže

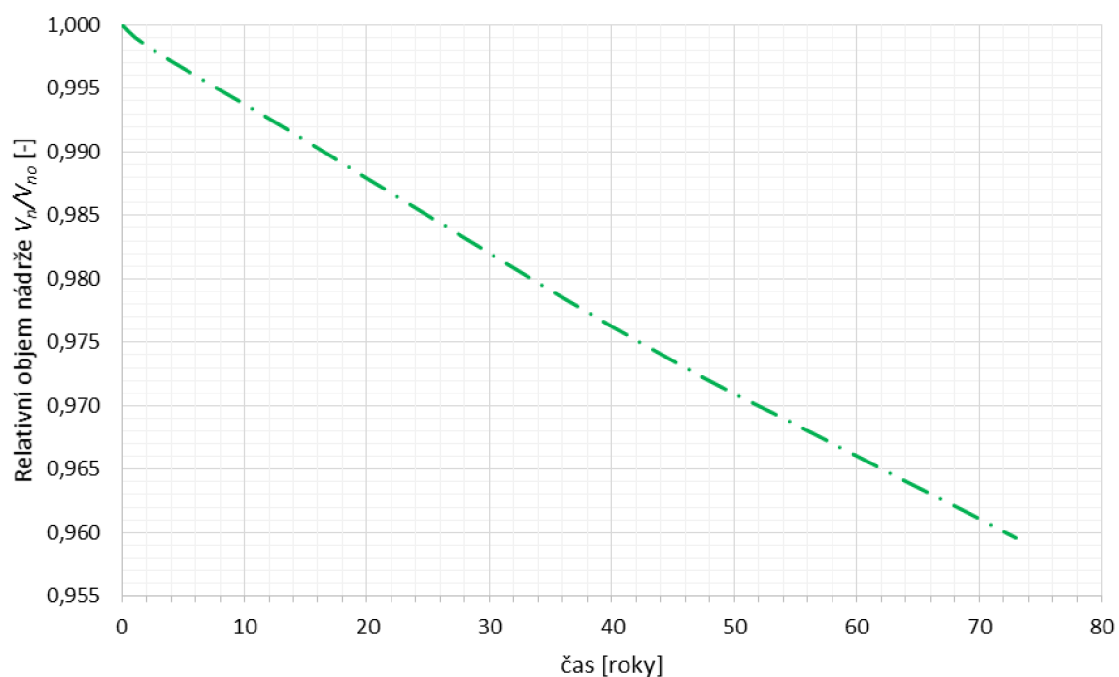
Simulace zanášení nádrže byla provedena ve variantě BUP na sérii standardních NRPV (dále označována BUP-H). Došlo pouze k úpravě horní okrajové podmínky po částech ustáleného proudění, kdy byla série dvou NRPV nahrazena sérií sta standardních NRPV a v okrajové podmínce sedimentačních dat byla zvýšena hodnota maximálního prohloubení na 3 m. Maximální prohloubení muselo být zvýšeno, protože při výpočtu bylo dosaženo původní hodnoty 2 m a výpočet by neodpovídal přirozenému formování koryta v přírodě. Standardní NRPV byla vybrána na základě jejího průběhu, kdy nedochází ke skokům mezi jednotlivými výsledky průměrného ročního průtoku v kapitole 6.8.1.

Přibližně po sérii 73 NRPV začalo docházet k zanášení profilu v km 2,859. Nestabilita se nepovedla odstranit a simulace zanášení nádrže byla tedy pouze 73 let. Vývoj koryta po 73 letech lze vidět na Obr. 6.21. V oblasti 1400 – 2100 m se začal tvořit delta nános.



Obr. 6.21 Zobrazení původního stavu a stavu po 73 letech

Hodnoty průtoku splavenin Q_s byly odečteny z příčného profilu v km 2,017 (zaústění toku do nádrže při zásobní hladině na konci prvního a druhého roku). Data byla následně vynesena do grafické podoby a jsou zobrazena na Obr. 6.22. Z hodnot lze konstatovat, že za 73 let budou zanesena přibližně 4 % nádrže.



Obr. 6.22 Zobrazení zanášení nádrže z programu HEC-RAS

7 ZANÁŠENÍ NÁDRŽE POMOCÍ BRUNEHO KŘIVKY

Předpověď vývoje zanášení nádrže se provádí pomocí 3D numerických modelů, kalibrovaných na známý průběh zanášení, u plochých nádrží pomocí 2D modelů a u relativně úzkých nádrží 1D modely. Tvorbou 2D a 3D modelů je značně složitá a časově náročná, provádí se zřídka a pro relativně krátkou dobu. 1D modely jsou nejpoužívanější. Všechny numerické modely jsou značně nestabilní, což potvrdil i výše provedený výpočet. Pro stanovení životnosti nádrže je proto vhodné využít jinou metodu např. Bruneho křivku.

Bruneho křivka

V roce 1953 Brune vytvořil empirický vztah pro odhad dlouhodobého zanášení nádrže na základě korelace přítoku a zachycených sedimentů. Vzorec byl odvozen z pozorování na nádrži „Tennessee Valley Authority“ v jihovýchodní části Spojených států [1].

Jedná se o jednu z nejvíce používaných metod pro odhad zanášení nádrže sedimenty. Výsledky jsou relativně spolehlivé pro nádrže v mírném podnebném pásu s trvalým přítokem vody. Metoda využívá velmi málo vstupních parametrů a to pouze objemu nádrže a roční přítok do nádrže. Bohužel je zde i omezení a metodu lze využít pouze pro dlouhodobě neměnné podmínky.

Princip metody spočívá ve stanovení účinnosti zachycení T_e , kterou lze stanovit z rovnice [4]:

$$T_e = \frac{V_{sp} - V_{so}}{V_{sp}}, \quad (7.1)$$

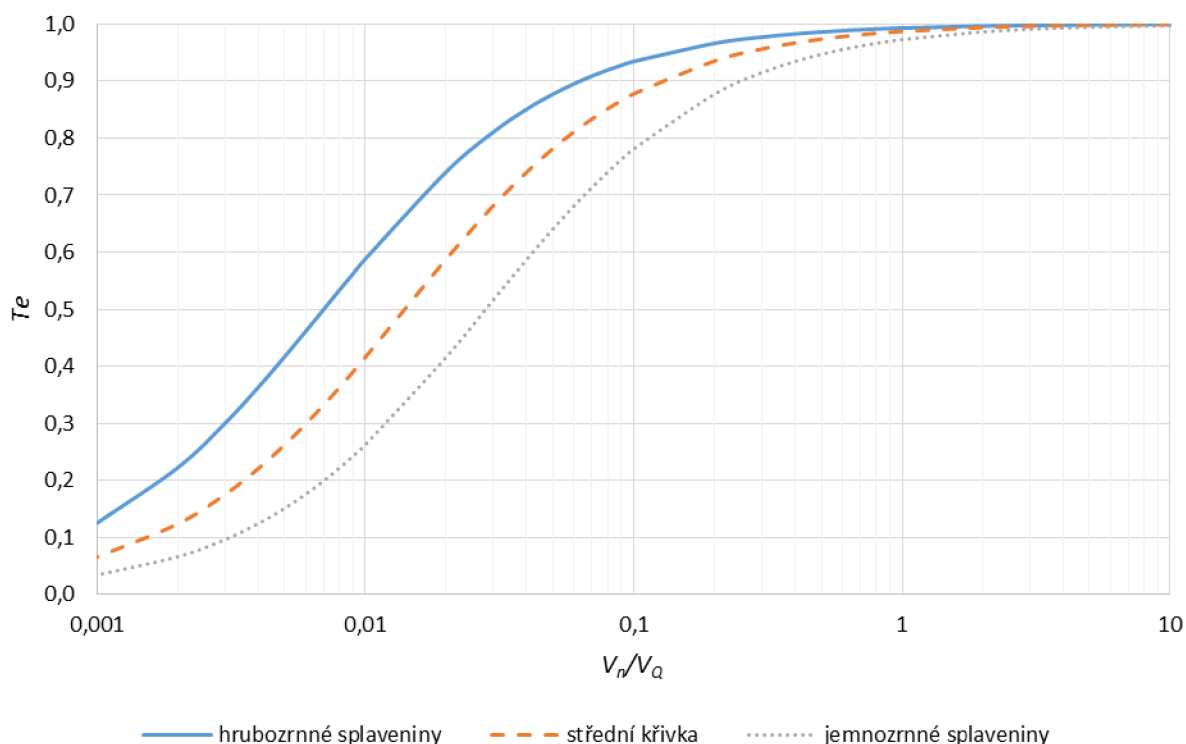
kde V_{sp} je objem přitečených splaven do nádrže za rok, V_{so} objem odtečených splavenin z nádrže za rok.

Jelikož není znám objem odtečených splavenin, je třeba stanovit hodnotu T_e na základě měření, což popisuje Bruneho křivka. Její matematické vyjádření se stanoví rovnicí [4]:

$$T_e = \frac{V_n / V_Q}{C_{Te} + V_n / V_Q}, \quad (7.2)$$

kde C_{Te} je součinitel účinnosti zachycení, V_n objem nádrže, V_Q objem vody proteklé nádrží za rok. Hodnota součinitele účinnosti zachycení je pro nádrže v mírném podnebném pásu $C_{Te} = 0,014$ (střední hodnota z měření). Pro hrubozrnné splaveniny má hodnotu $C_{Te} = 0,007$ a pro jemnozrnné splaveniny $C_{Te} = 0,028$. Účinnost zachycení je závislá na průtoku,

vlastnostech splavenin, velikosti a tvaru nádrže atd. Je nutné brát výpočet pouze jako orientační. Pokud jsou vyžadovány hodnoty přesnější, je nutno součinitel stanovit například měřením [4].



Obr. 7.1 Účinnost zachycení splavenin nádrží vyjádřená poměrem objemu nádrže a objemu vody protéké za rok, modifikovaná Bruneho křivka

Zanášení se předpovídá podle rovnice spojitosti doplněné o účinnost zachycení [4]

$$\Delta V_n = -\frac{T_e \cdot Q_s \cdot \Delta t}{1 - n_p}, \quad (7.3)$$

kde Q_s je objemový průtok splavenin, Δt je časový krok a n_p je pórovitost usazenin stanovená dle rovnice (3.6).

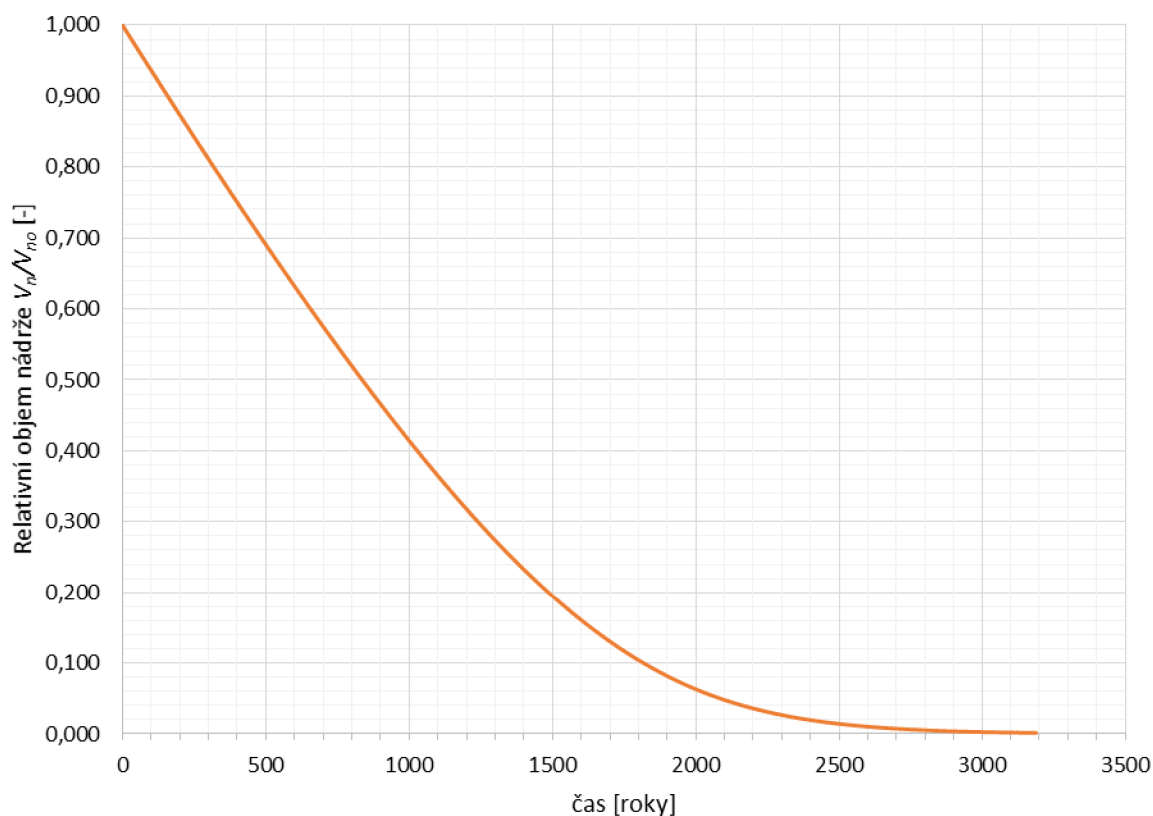
Výsledky se nejčasněji prezentují v grafické podobě časového vývoje objemu nádrže v absolutním či relativním vyjádření.

8 ZHODNOCENÍ OBOU VARIANT DLE BRUNEOHO KŘIVKY

Celkový objem nádrže V_n vodního díla Nové Heřminovy je dán součtem zásobního prostoru a prostoru stálého nadržení (Obr 2.8) a jeho hodnota je 3,27 mil. m³. Objem vody proteklé nádrží za rok V_Q byl stanoven z průměrného ročního průtoku Q_a uvedeného v kapitole 6.2. Hodnota V_Q byla 110,38 mil. m³. Objemové průtoky splavenin Q_s pro obě varianty byly stanoveny z výsledných hodnot z programu HEC-RAS. Částice d_{50} byla dle zrnitostní křivky 0,038 m. Pro výpočty byla využívána křivka doporučená pro hrubozrnné splaveniny.

8.1 Varianta BUP

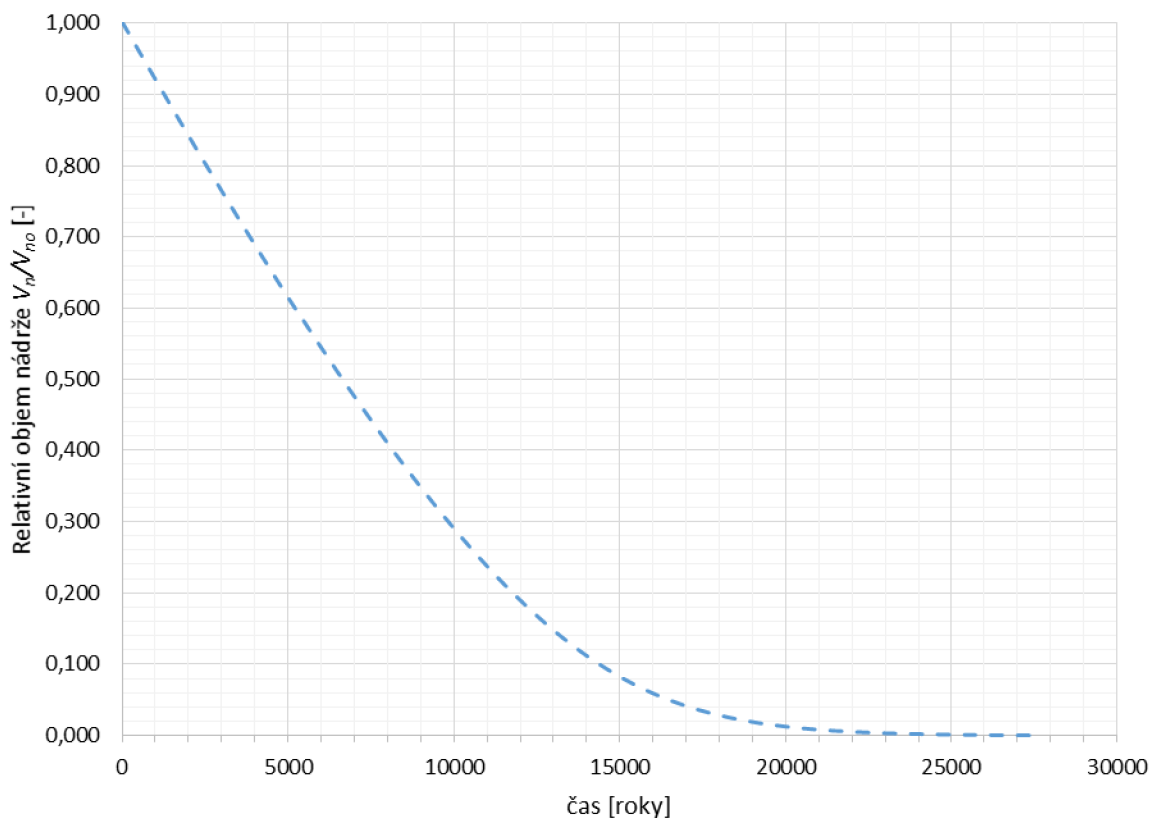
Pokud bude vybudována nádrž bez usazovacího prostoru, dojde k zanesení nádrže poměrně rychle. Objem nádrže klesne o 50 % za cca 830 let a celková životnost nádrže je cca 3 200 let.



Obr. 8.1 Vyhodnocení životnosti nádrže - varianta BUP

8.2 Varianta SUP

Pokud bude vybudovaný usazovací prostor dle navrhovaného stavu a bude probíhat umělý transport splavenin, dojde ke značnému snížení přítoku sedimentů. 50 % nádrže bude zaneseno cca za 6 600 let a celková životnost nádrže je cca 27 700 let. Usazovací prostor plní svoji funkci na zachycení splavenin. Do nádrže se dostávají pouze splaveniny erozí dna v úseku mezi zaústěním toku do nádrže a koncem usazovacího prostoru a částečně splaveniny z úseku nad usazovacím prostorem.



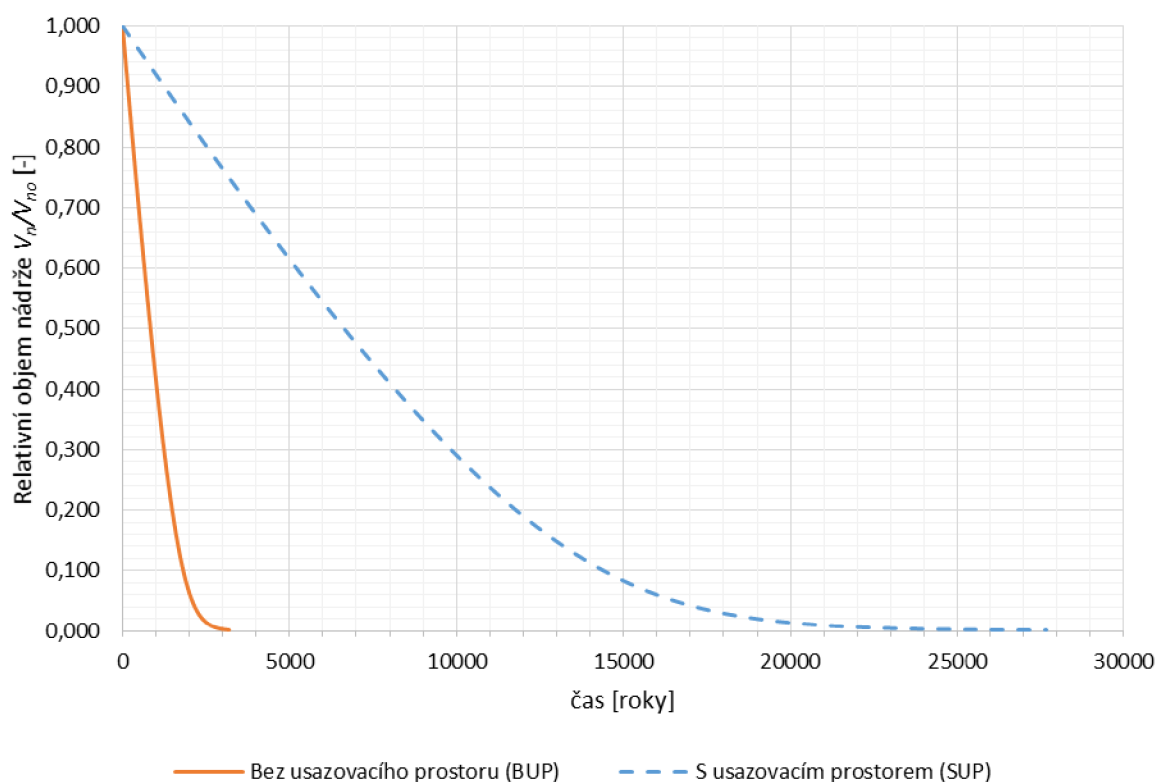
Obr. 8.2 Vyhodnocení životnosti nádrže - varianta SUP

9 POROVNÁNÍ ZANÁŠENÍ NÁDRŽÍ

V následujících kapitolách budou porovnány varianty BUP a SUP a také varianty BUP a BUP-H. Pro variantu SUP nebyl proveden model dlouhodobého zanášení nádrže pomocí programu HEC-RAS, protože se v modelu SUP vyskytuje usazovací prostor, který musí být po určitém čase čištěn.

9.1 Porovnání variant BUP a SUP

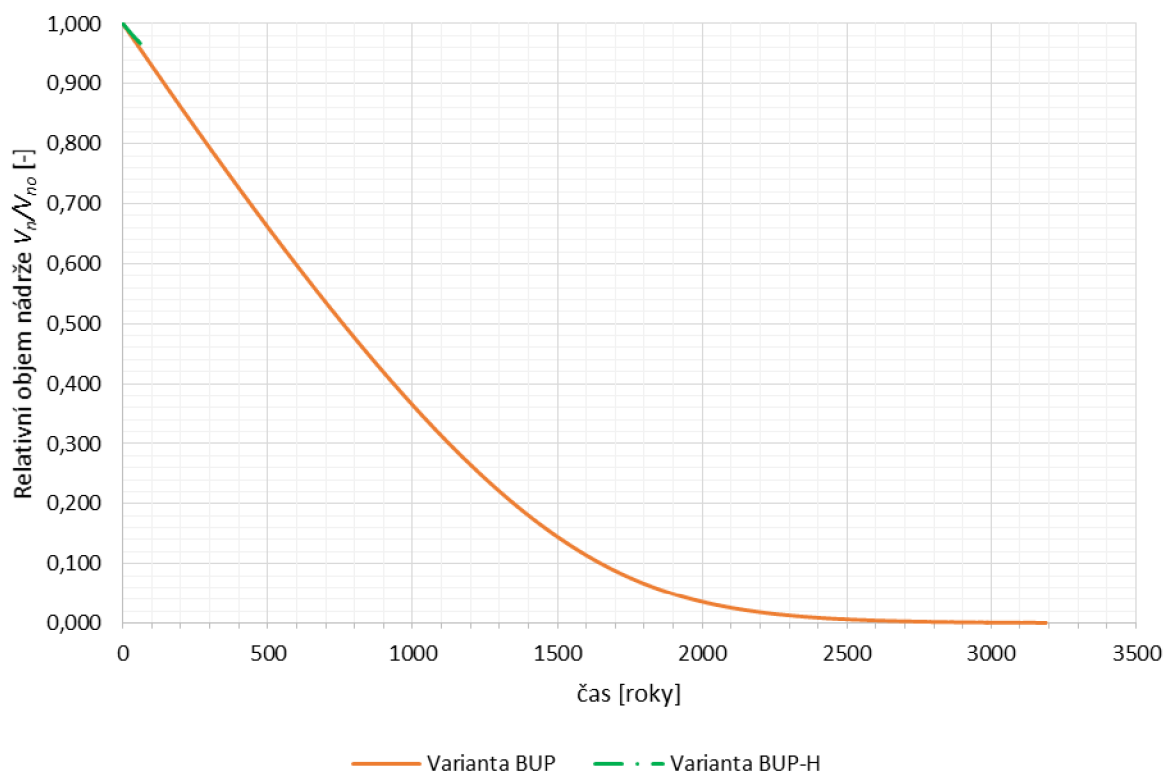
V porovnání variant BUP a SUP je přítok sedimentů do nádrže ve variantě SUP přibližně 8x nižší než ve variantě BUP. Lze tedy konstatovat, že usazovací prostor před nádrží má požadovaný efekt na snížení přítoku sedimentů do nádrže. Životnost nádrže je v případě varianty SUP přibližně 8x větší (27 700 let) než u varianty BUP (3 200 let). Usazovací prostor je třeba pravidelně čistit, aby byla zajištěna jeho funkčnost. Porovnání životnosti obou variant je zobrazeno na Obr. 9.1.



Obr. 9.1 Porovnání životnosti nádrže dle variant SUP a BUP

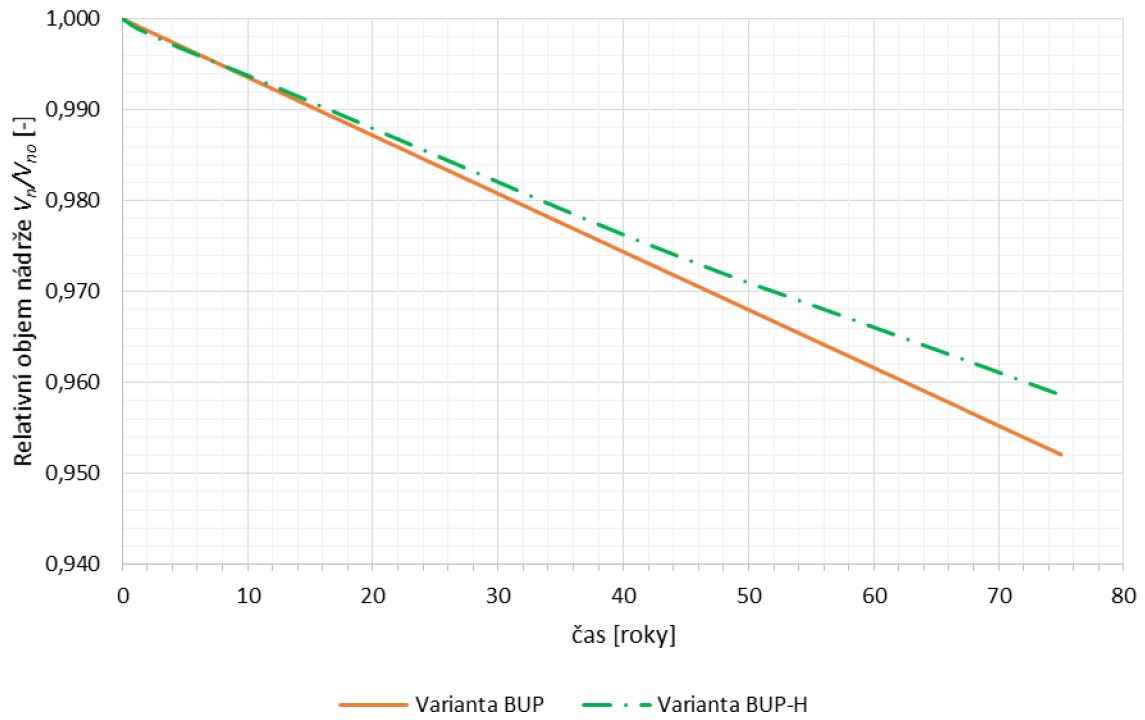
9.2 Porovnání varianty BUP a BUP-H

Na Obr 9.2 je zobrazeno porovnání životnosti nádrže dle obou BUP a BUP-H variant.



Obr. 9.2 Porovnání životnosti nádrže dle variant BUP a BUP-H

V programu HEC-RAS se povedlo simulovat pouze 73 let z důvodu nestability výpočtu v dalších letech, která se nepovedla odstranit. Pro lepší porovnání byla data varianty BUP zkrácena na 73 let a následně znovu vynesena do grafu (Obr. 9.3). Z grafu lze konstatovat, že zanášení nádrže ve variantě BUP-H probíhá pomaleji. Na konci zkoumaného úseku je ve variantě BUP zaneseno přibližně 4,6 % a ve variantě BUP-H 4,0 % z celkového objemu nádrže. Rozdíl hodnot tedy činí 0,6 %. V případě VD Nové Heřminovy s objemem nádrže 3,27 mil. m³, je rozdíl objemu nánosů přibližně 20 000 m³. Rozdíl může být způsoben programem HEC-RAS, který nepočítá se splachem, ale pouze se splaveninami koryta.



Obr. 9.3 Porovnání živostnosti nádrže dle variant BUP a BUP-H pro 73 let

10 ZÁVĚR

První část diplomové práce byla věnována popisu zájmové lokality včetně hydrologických, klimatických, geologických, pedologických poměrů, základních parametrů VD Nové Heřminovy a splaveninového režimu na řece Opavě.

Dále byly definovány teoretické základy potřebné k porozumění dané problematice. Zejména základní rozdělení částic v proudu, vývoj krycí vrstvy, počátek pohybu splavenin, výpočty proudění vody a splavenin.

Navazující část popisovala zanášení nádrží a opatření proti zanášení. V návrhovém stavu VD Nové Heřminovy se předpokládá s umístěním usazovacího prostoru, který byl popsán.

Pro 1D model transportu splavenin byl použit program HEC-RAS. Program a jeho nastavení je podrobně popsáno v kapitole 6. Pro výpočty bylo použito po částech ustáleného proudění a modulu pro transport splavenin.

Prvním modelem byl model stávajícího stavu. Drsnost dna byla stanovena dle Stricklera na hodnotu 0,030. Pro inundační území byly hodnoty drsnosti určeny z fotografií pořízených při osobní obchůzce a za pomoci tabulek drsností. Model bylo dále třeba kalibrovat. Kalibrace modelu probíhala v několika fázích. První fází bylo simulování průtoků Q_5 , Q_{10} , Q_{20} , Q_{50} , Q_{100} . Simulace ukázala, že dochází k překryvům hladin, proto bylo třeba některé profily geometricky upravit. Duhou fází byla kalibrace na kapacitu koryta, která je odhadována v daném úseku mezi Q_1 až Q_5 . Po provedení druhé fáze bylo třeba zvětšit hodnotu drsnosti dna až na hodnotu 0,036. Následně bylo zahájeno testování a kalibrace modulu sedimentů. Na upravené průtokové řadě z let 2009 – 2015 byl testován vývoj krycí vrstvy. Hodnoty byly porovnávány v úseku km 2,890, kde byly známy zrnitostní křivky z odběrů v roce 2015. Nedošlo k celkovému porušení krycí vrstvy, ale pouze k jejímu vytřídění. Zrnitostní složení v programu HEC-RAS přibližně odpovídalo zrnitostním křivkám odebraných vzorků. Model stávajícího stavu byl dále testován na stabilitu při PV_5 , PV_{10} , PV_{20} , PV_{50} , PV_{100} . Model vykazoval nestability způsobené zanášením některých profilů, proto bylo nutné upravit u některých profilů rozsah vymílání. V současné době je v řece Opavě, vyvinutá krycí dlažba. Z tohoto důvodu byl proveden výpočet počátečního pohybu splavenin, který byl stanoven na hodnotu $17,13 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Z hodnot m-denních průtoků a extrapolovaných hodnot m-denních průtoků byly vytvořeny tři NRPV (standardní, sestupná a vzestupná). NRPV byly následně omezeny hodnotou počátečního pohybu splavenin.

Pro model BUP byl použit kalibrovaný model stávajícího stavu. Došlo ke změně dolní okrajové podmínky na hladinu zásobního prostoru nádrže a při větších průtocích dle transformace hladiny PV. V km 3,151 – 4,324 došlo ke změně geometrie. Drsnosti ve dně zůstaly stejné, pouze v inundačním území byly změněny.

Posledním modelem byl model SUP. Model vznikl na základě modelu BUP. Změněna byla pouze v geometrii v úseku km 3,151 – 2,773 (přidání usazovacího prostoru). Dále došlo ke změně drsnosti a v místě spádového objektu byla nastavena hodnota maximálního prohloubení na 0 m.

Výstupem výpočtu varianty BUP a SUP na sérii dvou po sobě jdoucích NRPV ve třech variantách byly hodnoty ročních průtoků splavenin. Výslednou hodnotou byl rozdíl mezi první a druhou NRPV, protože po první NRPV došlo k vytrídění krycí vrstvy v modelu. Průměrný roční průtok splavenin byl největší ve variantě sestupné NRPV v obou modelech BUP i SUP. Druhým výstupem byla simulace 100 NRPV zanášení nádrže pro upravenou variantu BUP-H. Úspěšně bylo simulováno pouze 73 NRPV. Poté začalo docházet k nestabilitě výpočtu, z důvodu zanášení profilu v km 2,859, kterou se nepodařilo odstranit.

Pomocí výpočtu dle Bruneho křivky byly získány hodnoty zanášení nádrže pro varianty BUP a SUP. Životnost nádrže ve variantě BUP byla stanovena na 3 200 let a pro variantu SUP šlo o 27 700 let. Obě varianty byly porovnány. Bylo zjištěno, že usazovací prostor před nádrží má požadovaný efekt na snížení přítoku sedimentů do nádrže. Životnost nádrže je v případě varianty SUP přibližně 8× větší než u varianty BUP, a to za předpokladu pravidelné údržby a zajištění funkčnosti usazovacího prostoru. Poslední porovnání se týká varianty BUP a BUP-H. Data z varianty BUP byla zkrácena na dobu 73 let, aby odpovídala rozsahu dat varianty BUP-H. Rozdíl hodnot po 73 letech činí 0,6 %. V případě VD Nové Heřminovy se jedná o objem cca 20 000 m³. K rozdílu došlo pravděpodobně vlivem programu HEC-RAS, který nepočítá se splachem ale pouze se splaveninami koryta.

11 SEZNAMY

11.1 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

α	sklon povrchu	°
C_{τ^*}	součinitel	
c_A	empirický součinitel vyjadřující počátek pohybu částice	
c_B	empirický součinitel vyjadřující průtok splavenin	
k_c	makrodrsnost dna	
k_s	mikrodrsnost dna	
γ_z	měrná tíha zrna	$\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$
b_e	efektivní šířka	m
C_c	číslo křivosti	
C_{Te}	součinitel účinnosti zachycení	
C_u	součinitel stejnozrnnosti	
d	velikost částice	m
d^*	bezrozměrná velikost částice	
d_d	velikost dolní částice	m
d_e	velikost efektivního zrna	m
d_h	velikost horní částice	m
d_m	velikost zrna	m
d_x	velikost částice s X% hmotnostním zastoupením	m
F_g	síla od tíhy reprezentativního objemu	N
F_{g_x}	síla od tíhy elementu	N
F_{p1}, F_{p2}	síly od hydrostatického tlaku	N
F_{τ}	třecí síla od smykového napětí	N
g	tíhové zrychlení	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
h	hloubka	m

h_e	efektivní hloubka	m
H_R	hladina ochranného prostoru	m n. m.
H_s	hladina stálého nadržení	m n. m.
h_s^t	hloubka splavenin v čase t (před časovým krokem)	m
$h_s^{t+\Delta t}$	hloubka splavenin v čase $t + \Delta t$ (po časovém kroku)	m
H_z	hladina zásobní prostoru	m n. m.
i	sklon čáry energie	
l_d	vzdálenost dolního profilu	m
l_h	vzdálenost horního profilu	m
l_k	vzdálenost úseku mezi profily	m
K_k	modul průtoku	
m	dennost	m
m	hmotnost	kg
N	letost	rok
n	součinitel drsnost	
n_d	součinitel drsnosti dna	
n_p	pórovitost usazenin	
Q_m	m-denní průtoky	$m^3 \cdot s^{-1}$
$\overline{q_{ms}}$	specifický hmotnostní průtok vážený pod vodou	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
q_{ms}	specifický hmotnostní průtok splavenin	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
Q_N	N-leté průtoky	$m^3 \cdot s^{-1}$
Q_s	objemový průtok splavenin	$m^3 \cdot s^{-1}$
$Q_{V,d}$	objemový průtok splavenin dolním profilem (odtok splavenin)	$m^3 \cdot s^{-1}$
$Q_{V,h}$	objemový průtok splavenin horním profilem (přítok splavenin)	$m^3 \cdot s^{-1}$
R	hydraulický poloměr	m
S	průtočný průřez (průtočná plocha)	m^2
t	čas	s

T	teplota	$^{\circ}\text{C}$
T_e	účinnosti zachycení	
V	objem	m^3
v	rychlost	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
V_n	objem nádrže	m^3
V_p	objem pórů	m^3
V_Q	objem vody proteklý nádrží za rok	m^3
V_{so}	objem odečtených splavenin z nádrže za rok	$\text{m}^3\cdot\text{rok}^{-1}$
V_{sp}	objem přitečených splaven do nádrže za rok	$\text{m}^3\cdot\text{rok}^{-1}$
V_t	objem zeminy	m^3
w	usazovací (sedimentační) rychlost	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Z_d	úroveň hladiny v profilu d	m n. m.
Z_h	úroveň hladiny v profilu h	m n. m.
Z_j	úroveň hladiny v profilu j	m n. m.
α	součinitel kinetické energie	
ξ_k	součinitel místní ztráty	
γ	měrná tíha vody	$\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$
γ_z	měrná tíha zrna	$\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$
Δt	časový krok	s
μ	dynamická viskozita	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
ρ	hustota vody	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ_z	hustota částice	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
τ^*	bezrozměrné smykové napětí	
τ^*_{c}	kritická hodnota τ^* vyjadřující vliv Re	
τ^*_{ca}	kritická hodnota τ^* vyjadřující vliv α	
$\tau^*_{ca\beta}$	kritická hodnota τ^* vyjadřující vliv α, β	
$\tau^*_{c\beta}$	kritická hodnota τ^* vyjadřující vliv β	

$\tau_{c\varphi}^*$	kritická hodnota τ^* vyjadřující vliv φ	
u	kinematická viskozita	$m^2 \cdot s^{-1}$

11.2 SEZNAM ZKRATEK

1D, 2D, 3D	jednorozměrný, dvourozměrný a třírozměrný model
BUP	bez usazovacího prostoru
BUP-H	bez usazovacího prostoru za pomoci programu HEC-RAS
ČHMU	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká republika
ČSN EN	česká technická norma převzatá z evropské normy
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center - River Analysis System
CH	koryto
CH7	chladný pás
ID	identifikační číslo
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci
KMH	kontrolní maximální hladina
LOB	levá berma
mil.	milion
MPM	Meyer-Peter and Muller
MT2	mírně teplý pás
n. m.	nad mořem
NRPV	návrhová roční průtoková vlna
Obr.	obrázek
PV	povodňová vlna
ROB	pravá berma
s. p.	státní podnik
SF	stupeň bezpečnosti
SMS	Surface-water Modeling System

SUP	s usazovacím prostorem
Tab.	tabulka
U. S.	Spojené státy americké
UP	usazovací prostor
UPDS	usazovací prostor dnových splavenin
UPP	usazovací prostor plavenin
VD	vodní dílo
VHP	vodohospodářský provoz
VP	vymílací prostor

11.3 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] GARCÍA, Marcelo H. *Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practice*. Reston, Va.: American Society of Civil Engineers, c2008. ISBN 0784408149.
- [2] BAČÍK, Ing. Martin, Ing. Jiří KALIŠ a Ing. Jelica KLÚČOVSKÁ. *Modelovanie zanášania nádrží*. Bratislava: Výskumný ústav vodného hospodárstva Bratislava, 1985.
- [3] MORRIS, Gregory L. a Jiahua. FAN. *Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use*. New York: McGraw-Hill, c1998. ISBN 007043302X.
- [4] ZACHOVAL, Zbyněk. *Splaveniny ve vodních tocích: Modul 1*. Brno, 2016. Studijní opora. Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební.
- [5] U.S. Army Corps of Engineers: *Hydrologic Engineering Center - River Analysis System* [online]. [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
- [6] ZACHOVAL, Zbyněk. Opatření na horní Opavě - příprava akce v období 2008 – 2010: Posouzení splaveninového režimu a prognóza - tok Opava v úseku Kunov až Krnov. Závěrečná zpráva. VUT v Brně, fakulta stavební, LVV, květen 2009.
- [7] ZACHOVAL, Zbyněk. Hydraulický modelový výzkum prostoru pro sedimentaci říčních splavenin v horní části zátopy VD Nové Heřminovy: Opatření na Horní Opavě, příprava akce v období 2013-2016. Závěrečná zpráva. VUT v Brně, fakulta stavební, LVV, březen 2016.

- [8] VÝZKUMNÝ ÚSTAV VODOHOSPODÁŘSKÝ. *HEIS VUV: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, veřejná výzkumná instituce* [online]. 2008, [cit. 2016-10-26]. Dostupné z: <http://heis.vuv.cz/>
- [9] Česká geologická služba: *On-line aplikace* [online]. [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/extranet/sluzby/aplikace/>
- [10] Povodí Odry. *Opatření na horní Opavě - přírodě blízká opatření* [online]. 2014 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: <https://www.pod.cz/OhO/index.html>
- [11] Ovocnářská unie České republiky. 1971. In: *Klimatické regiony ČR (dle Quitt, 1971)* [online]. [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.ovocnarska-unie.cz/sispo/?str=klima-mapa>
- [12] Ministerstvo životního prostředí: *Povodňový plán České republiky* [online]. 2014 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: http://webmap.dppcr.cz/dpp_cr/isapi.dll?MAP=obj_dpp&x=-521193.6&y=-1076756.1&z=1e-5&TMPL=AJAX_MAIN
- [13] JANDORA, Jan, Vlastimil STARA a Miloš STARÝ. *Hydraulika a hydrologie*. Vyd. 2., V Akademickém nakladatelství CERM 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 186 s. ISBN 978-80-7204-739-0.
- [14] Google maps. [online]. [cit. 2016-10-11]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps>
- [15] Povodí Odry s.p. [online]. [cit. 2017-01-05]. Dostupné z: <https://www.pod.cz/>
- [16] TÍŽKOVÁ, Věra. G-CONSULT, SPOL. S. R.O. *NÁDRŽ NOVÉ HEŘMINOVY, ÚPRAVA OPAVY A SOUVISEJÍCÍ OPATŘENÍ* [online]. 2010 [cit. 2017-01-05]. Dostupné z: http://portal.cenia.cz/eiasea/detail/EIA_MZP291
- [17] Nové Heřminovy: *Oficiální webové stránky obce* [online]. [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://www.noveherminovy.eu/>
- [18] Seznam řek v Česku. Wikipedie [online]. [cit. 2016-08-01]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Seznam_řek_v_Česku
- [19] Aquaveo: Surface-water Modeling System [online]. [cit. 2017-01-01]. Dostupné z: <http://www.aquaveo.com/software/sms-surface-water-modeling-system-introduction>

[20] Český hydrometeorologický ústav [online]. [cit. 2017-01-09]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/>

11.4 SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 m-denní průtoky [6]	15
Tab. 2.2 N-leté průtoky [6].....	16
Tab. 3.1 Značení zemin dle charakteristické velikosti částice [4].....	19
Tab. 3.2 Hodnoty hustoty vody, kinematické a dynamické viskozity vody [4].....	21
Tab. 6.1 Extrapolované m-denní průtoky Q_m [6].....	47
Tab. 6.2 Transportní funkce s rozsahem platnosti dostupné v programu HEC-RAS.....	51
Tab. 6.3 Hodnoty Q_s při standardní, sestupné a vzestupné NRPV pro SUP a BUP v km 2,017	63

11.5 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Přehledná mapa největších řek v ČR [18]	11
Obr. 2.2 Územní působnost Závodu Opava [15].....	12
Obr. 2.3 Území VHP Krnov [15].....	13
Obr. 2.4 Vodohospodářská mapa 15-31 [8].....	14
Obr. 2.5 Geologická mapa [9]	15
Obr. 2.6 Mapa záplavového území Q_5 , Q_{20} , Q_{100} v zájmové oblasti [12].....	16
Obr. 2.7 Klimatické regiony ČR dle Quitta [11]	17
Obr. 2.8 Menší nádrž Nové Heřminovy [10]	18
Obr. 3.1 Dělení částic v korytě toku dle jejich pohybu v proudu [4]	22
Obr. 3.2 Vrásy [13]	23
Obr. 3.3 Duny [13]	24
Obr. 3.4 Antiduny [13].....	24
Obr. 3.5 Detail dnové dlažby v toku Opava (2016)	25
Obr. 3.6 Schéma pro výpočet smykového napětí [4]	25
Obr. 3.7 Schéma pro výpočet Bernoulliho rovnice [7]	29

Obr. 3.8 Schéma pro výpočet spojitosti splavenin [7]	30
Obr. 4.1 Sedimentace v podélném směru [3]	34
Obr. 4.2 Delta nános [3].....	35
Obr. 4.3 Klínový nános [3]	35
Obr. 4.4 Zuzující se nános [3].....	36
Obr. 4.5 Rovnoměrný nános [3]	36
Obr. 4.6 Příčný řez vývoje zanášení a eroze v nádrži Lake Francis Case na řece Missouri [3]	37
Obr. 4.7 Podélný profil nádrže Bhakra v Indii (podélné staničení nebylo součástí obrázku) [3]	39
Obr. 5.1 Usazovací prostor splavenin VD Nové Heřminovy [7]	42
Obr. 6.1 Ikona programu HEC-RAS [5].....	43
Obr. 6.2 3D modelu návrhového stavu se zvolenými příčnými řezy v programu SMS	44
Obr. 6.3 Pohled na řeku Opavu po proudu – v modelu cca km 4,196.....	45
Obr. 6.4 Dnová dlažba v toku Opava (2016) – v modelu cca km 3,555.....	45
Obr. 6.5 Dnová dlažba v toku Opava (2016) – v modelu cca km 3,151.....	46
Obr. 6.6 Pohled z mostu silnice 4581 proti proudu – v modelu km 2,089.....	46
Obr. 6.7 Hydrologická data v obci Karlovice v letech 2009 – 2015 [7]	47
Obr. 6.8 Povodňové vlny [7]	48
Obr. 6.9 Zrnitostní křivka stanovená z dlouhodobého pozorování	49
Obr. 6.10 Po částech ustálené proudění [5]	50
Obr. 6.11 Třídění částic dle Thomase (Exner 5).....	52
Obr. 6.12 Situace stávajícího stavu v programu HEC-RAS.....	54
Obr. 6.13 Upravená průtoková řada pro vývoj krycí vrstvy.....	56
Obr. 6.14 Vývoj krycí vrstvy v km 2,890	57
Obr. 6.15 Zrnitostní křivky krycí vrstvy dna (3x odebrané vzorky + dlouhodobé pozorování) [7] a zobrazení zrnitostí d_{10} , d_{50} a d_{90} z programu HEC-RAS v km 2,890.....	57

Obr. 6.16 Extrapolované hodnoty m-denních průtoků, výpočtové rovnice a hodnota spolehlivosti R	59
Obr. 6.17 Extrapolované průtoky NRPV (3 varianty) a průtoku Q_{\min}	59
Obr. 6.18 Standardní NRPV	60
Obr. 6.19 Sestupná NRPV	61
Obr. 6.20 Vzestupná NRPV	61
Obr. 6.21 Zobrazení původního stavu a stavu po 73 letech.....	64
Obr. 6.22 Zobrazení zanášení nádrže z programu HEC-RAS.....	64
Obr. 7.1 Účinnost zachycení splavenin nádrží vyjádřená poměrem objemu nádrže a objemu vody proteklé za rok, modifikovaná Bruneho křivka	66
Obr. 8.1 Vyhodnocení životnosti nádrže - varianta BUP	67
Obr. 8.2 Vyhodnocení životnosti nádrže - varianta SUP	68
Obr. 9.1 Porovnání životnosti nádrže dle variant SUP a BUP	69
Obr. 9.2 Porovnání životnosti nádrže dle variant BUP a BUP-H	70
Obr. 9.3 Porovnání životnosti nádrže dle variant BUP a BUP-H pro 73 let	71